

Estudi de giroscopis analògics i digitals aplicats a l'àmbit marí

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Josep Lluís Pujol Company

Dirigit per:
Rosa Maria Fernàndez Cantí

Doble titulació en Grau en Tecnologies Marines i Grau en Enginyeria de
Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 6 d'octubre de 2020

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i informàtica
industrial



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Agraïments

En aquest apartat vull expressar el meu màxim agraïment a la professora Rosa Maria Fernàndez per haver-me guiat durant tots aquests mesos per poder dur a terme el projecte, així com la confiança que ha dipositat en mi per realitzar aquest projecte.

Per altre banda agrair a totes aquelles persones que al llarg de tot el projecte m'han ajudat de qualsevol forma per tirar-lo endavant ja sigui amb implicació directa o indirecta.

Agrair en especial al Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i informàtica industrial per deixar-me el prototip de la Balancing ball d'Acrome per poder dur a terme les proves del projecte.

Finalment també vull agrair als meus pares i àvia per l'ajut que m'han brindat durant tot el projecte, així com el suport moral i econòmic que han permès que pugui cursar els estudis.

Prefaci

Els sistemes d'estabilització convencionals normalment només es centren o permeten estabilitzar un sol grau de llibertat, això va impulsar una recerca per trobar una alternativa real que em permetés assolir l'estabilitat en el pla, ja que degut a la naturalesa del mar és pràcticament impossible compensar la translació vertical d'un cos en el mar. Va ser a segon curs de grau, en un treball de l'assignatura de Construcció Naval, quan vam haver d'investigar sobre un sistema del nostre interès sobre els vaixells, i així va ser com vaig tenir el primer contacte amb l'estabilització marítima mitjançant giroscopis mecànics.

Aquest mecanisme em va marcar ja que no requeria d'electrònica i això l'eximia de problemes derivats de la caiguda de la planta elèctrica, ja que fonamentalment és basa d'un volant d'inèrcia que genera un parell escorant.

Finalment va arribar el moment de realitzar el treball de final de grau, en aquell moment ja tenia clar que no volia realitzar un treball purament teòric sinó que volia que la part pràctica i experimental fossin les de més pes en el treball, i això em va dur a voler realitzar un 'ROP' marí amb un sistema de posicionament dinàmic, però encara estava en només una idea ja que, ja hi havia bastants company interessats en fer cosses similars i no volia fer alguna cosa que fes tothom. Va ser llavors quan vaig començar a mirar treballs per saber quins temes eren adequats per elaborar el treball de fi de grau al mateix temps que començar a cerca tutor/a pel treball, finalment vaig parlar amb la professora Maria Rosa Fernández i sobre la idea del 'ROP' vàrem especificar més concretament el tema del treball, va ser llavors quan se'm va plantejar la idea de comparar quin tipus de giroscopi era més adequat per realitzar la compensació de l'escora, un digital o un mecànic?

Resum

Actualment els mètodes d'estabilització d'embarcacions estan molt desenvolupats i en tenim de diversos tipus i per a diverses aplicacions, no obstant no hem pogut trobar cap resposta a la pregunta que proposa la comparació entre l'estabilització emprant giroscopis analògics o digitals.

En aquest document es presenta la comparació completa entre aquests dos tipus de giroscopis, digital i analògic, amb la finalitat de compensar l'escorament d'un compartiment d'una embarcació. Per simular-ho s'ha construït una capsa de contraxapat de 20x20x20 cm.

Abarca totes les fases de disseny, construcció i implementació en diverses situacions forçades per poder extreure unes conclusions que ens permetin saber quin dels 2 tipus de giroscopis és millor per estabilitzar en l'àmbit marí, així com també un estudi econòmic per poder extreure una valoració més completa.

En una primera part es fa una breu introducció als conceptes de giroscopi, englobant l'efecte giroscopi, la precessió i la nutació. Tanmateix hi ha una citació de diferents tipus de giroscopi així com la seva aplicació al món actual i també a l'entorn marí.

En la següent part es presenten les especificacions que han complir els sistemes d'estabilització per d'estabilitzar els models, així com les estructures, els materials i elements que els conformaran. Seguidament es mostra el procés de disseny del controlador del sistema digital on veurem tot el procediment començant per la identificació de la planta fins a la obtenció del llaç de control.

La darrera part del projecte presenta les proves realitzades als models per tal de poder valorar el seu desenvolupament i poder així extreure una resposta l'objectiu del projecte. D'altra banda també es realitza un estudi econòmic per tal de saber quins costos tenim previstos per al pressupost inicial i quins hi ha en el pressupost final a fi de poder valorar si s'ha realitzat una bona planificació.

Abstract

Currently many stability systems for ships are developed and have different types of applications, however we have not been able to find any answer to the question posed by the comparison between stabilization using analog or digital gyroscopes.

This document presents the complete comparison between these two types of gyroscopes, digital and analogic, with the purpose of compensating the heel of a compartment of a ship. To simulate this, a 20x20x20 cm counter-plated box has been built.

The project covers all the phases of design, construction and implementation in various situations in order to draw conclusions that allow us to know which of the 2 types of gyroscopes is best to stabilize in the marine field, as well as an economic study to extract an assessment more complete.

The first part includes a brief introduction to the concepts of gyroscope, including the gyroscope effect, precession and nutation. However, there is a citation of different types of gyroscope as well as their application in today's world and also in the marine environment.

In the following part we present the specifications that stabilization systems must meet to stabilize the models, as well as the structures, materials, and elements that will shape them. Next it is shown the design process of the digital system controller where we will see the whole procedure starting with the identification of the plant until obtaining the control loop.

The last part of the project presents the tests carried out on the models in order to be able to assess their development and thus be able to extract an answer to the objective of the project. On the other hand, an economic study is also carried out in order to know what costs we have foreseen for the initial budget and what are in the final budget in order to be able to assess if a good planning has been carried out.

Taula de continguts

AGRAÏMENTS	5
PREFACI	6
RESUM	7
ABSTRACT	8
TAULA DE CONTINGUTS	9
LLISTAT DE FIGURES	13
LLISTAT DE TAULES	18
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	21
1.1 MOTIVACIÓ	21
1.2 OBJECTIUS DEL TREBALL	23
1.2.1 OBJECTIU PRINCIPAL	23
1.2.3 OBJECTIUS ESPECÍFICS	23
1.3 PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	24
1.3.1 GUIÓ DEL PROJECTE	24
1.3.2 DIAGRAMA DE GANTT DEL PROJECTE	25
1.3.3 PROCÉS DE DISSENY	26
1.4 ORGANITZACIÓ DE LA MEMÒRIA	27
CAPÍTOL 2. ESTABILITAT	29
2.1 QUÈ ÉS L'ESTABILITAT	29
2.2 CONCEPTES BÀSICS	30
2.3 EQUILIBRI	30
2.4 ESTABILITAT ESTÀTICA TRANSVERSAL	31
2.5 BRAÇ ADRISSANT	31

CAPÍTOL 3. GIROSCOPIS	33
3.1 QUÈ ÉS UN GIROSCOPI	33
3.2 COM FUNCIONA UN GIROSCOPI	33
3.2.1 EFECTE GIROSCÒPIC	33
3.2.2 PRECESSIÓ	36
3.2.3 NUTACIÓ	38
3.3 TIPUS DE GIROSCOPIS	39
3.3.1 GIROSCOPI MECÀNIC (ANALÒGIC)	39
3.3.2 GIROSCOPI DIGITAL	41
3.3.3 <i>RING LASER GYROSCOPE</i>	41
3.3.4 GIROSCOPI ÒPTIC	41
3.4 APLICACIONS DEL GIROSCOPI	42
3.4.1 GIROCOMPÀS	42
3.4.2 INDICADOR D'ANGLES	42
3.4.3 ESTABILITZADOR	42
3.4.4 COMBINACIÓ AMB D'ALTRES ELEMENTS	43
3.5 GIROSCOPI EN L'ÀMBIT MARÍ	43
3.5.1 EL GIROSCOPI COM A INDICADOR D'ANGLES EN L'ÀMBIT MARÍ	45
3.5.2 EL GIROSCOPI COM A GIROCOMPÀS EN L'ÀMBIT MARÍ	46
3.5.3 EL GIROSCOPI COM A ESTABILITZADOR EN L'ÀMBIT MARÍ	46
3.4.4 EL GIROSCOPI EN EL MÓN REAL COM A SISTEMA D'ESTABILITZACIÓ MARÍTIMA	48
CAPÍTOL 4. ESPECIFICACIONS I SELECCIÓ DE LA INSTRUMENTACIÓ	51
4.1 DEFINICIÓ D'ESPECIFICACIONS	51
4.2 INSTRUMENTACIÓ PER AL MODEL DIGITAL	52
4.3 INSTRUMENTACIÓ PER AL MODEL ANALÒGIC	55
CAPÍTOL 5. DISSENY DE L'ESTRUCTURA I MATERIALS DELS MODELS	57
5.1 ESPECIFICACIONS I FORMA DEL MODEL	57
5.2 MATERIALS	59
5.3 DISSENY DELS MODELS	59
5.4 DISSENY DEL MODEL DIGITAL	59
5.4.1 UBICACIÓ DEL SENSOR	60
5.4.2 CONFIGURACIÓ DE LES ARTICULACIONS	60
5.4.3 MODEL DIGITAL	62
5.5 DISSENY DEL MODEL MECÀNIC (ANALÒGIC)	63
5.5.1 CONFIGURACIÓ DEL SISTEMA D'ESTABILITZACIÓ MECÀNIC	63
5.5.2 ELECCIÓ DEL TIPUS DE GIROSCOPI	63
5.5.3 IMPLEMENTACIÓ DELS GIROSCOPIS	64

5.5.4 SUPORT DELS GIROSCOPIS	65
5.5.5 SISTEMA D'ARTICULACIONS	66
5.5.6 SISTEMA ELÈCTRIC DEL MODEL MECÀNIC	67
CAPÍTOL 6. CONSTRUCCIÓ DELS MODELS	69
6.1 LLISTAT D'EINES I MATERIALS	69
6.2 CONSTRUCCIÓ DEL MODEL DIGITAL	70
6.3 CONSTRUCCIÓ DEL MODEL ANALÒGIC	72
CAPÍTOL 7. SISTEMA DE CONTROL D'ESTABILITZACIÓ DIGITAL	78
7.1 CALIBRAT DEL SENSOR	78
7.2 ACTUADORS. SERVOMOTOR MG996R	95
7.3 DISSENY DEL CONTROLADOR	96
7.3.1 MODEL DE LA PLANTA	96
7.3.2 CONFIGURACIÓ DEL LLAÇ DE CONTROL	104
COMPARACIÓ DELS DIFERENTS PARÀMETRES DEL LLAÇ DE CONTROL	111
7.4 SISTEMA ELÈCTRIC I ELECTRÒNIC	114
7.4.1 SISTEMA ELÈCTRIC DEL MODEL DIGITAL	114
7.4.2 SISTEMA ELECTRÒNIC DEL MODEL DIGITAL	115
CAPÍTOL 8. PROVES I RESULTATS	117
8.1 BANC DE PROVES	117
8.2 PROVES	118
8.2.1 PROVA 1	118
8.2.2 PROVA 2	119
8.2.3 PROVA 3	119
8.3 RESULTATS DE LES PROVES	119
8.3.1 RESULTAT PROVA 1 SISTEMA DIGITAL	119
9.3.2 RESULTAT PROVA 2 SISTEMA DIGITAL	124
8.3.3 RESULTAT PROVA 3 SISTEMA DIGITAL	128
8.3.4 VALORACIÓ DELS RESULTATS SISTEMA DIGITAL	128
8.3.5 RESULTAT PROVA 1 SISTEMA ANALÒGIC	129
8.3.6 RESULTAT PROVA 2 SISTEMA ANALÒGIC	134
8.3.7 RESULTAT PROVA 3 SISTEMA ANALÒGIC	138
8.3.8 VALORACIÓ DELS RESULTATS SISTEMA ANALÒGIC	138
CAPÍTOL 9. PRESSUPOST	140

9.1 PRESSUPOST INICIAL	140
9.1.1 MODEL ANALÒGIC	140
9.1.2 MODEL DIGITAL	141
9.1.3 PRESSUPOST INICIAL TOTAL	141
9.2 PRESSUPOST FINAL	141
9.2.1 MODEL ANALÒGIC	142
9.2.2 MODEL DIGITAL	142
9.2.3 MATERIALS I EINES ADQUIRITS PER AQUEST PROJECTE	142
9.2.4 PRESSUPOST FINAL TOTAL	143
9.2.5 VALORACIÓ DE COSTOS	143
 CAPÍTOL 10. CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES	 145
 BIBLIOGRAFIA I REFERÈNCIES	 149
 ANNEX I	 154
 PLÀNOLS DEL SISTEMES D'ESTABILITZACIÓ	 154

Llistat de Figures

Figura 1. Número de persones marejades en funció del motiu de l'embarcament Font: [3].....	21
Figura 2. Mareig en funció de la predisposició a estar-ho Font: [3].....	22
Figura 3. Graus de llibertat en una embarcació. Font: [35].....	22
Figura 4. Diagrama de Gantt del projecte plantejat inicialment.....	26
Figura 5. Disseny en espiral	26
Figura 6. Conceptes clau. Font [29]	30
Figura 7. Equilibri inicial Font: [29]	31
Figura 8. Braç adriasant Font: [29].....	32
Figura 9. Efecte giroscopi en massa puntual Font: [30]	34
Figura 10. Forces aplicades a un cos en rotació Font: [20]	35
Figura 11. Efecte de precessió Font: [36]	36
Figura 12. Representació de la tendència dels moments quan es pertorba el sistema Font: [20].....	36
Figura 13. Cos inercial en rotació subjectat per un sol punt, prof. Walter Lewin Font: [20]	37
Figura 14. Efecte de nutació Font: [5]	39
Figura 15. USS Henderson Font: [13].....	44
Figura 16. SS Conte di Savoia Font: [11]	45
Figura 17. Eix de rotació vertical Font: [12].....	47
Figura 18. Eix de rotació horitzontal Font: [12]	47
Figura 19. Placa Arduino Mega Font: [39]	52
Figura 20. IMU MPU 6050 Font: [40].....	53
Figura 21. Servomotor MG996r Font: [24]	53
Figura 22. Impulsos de control d'un servomotor Font:[24]	54
Figura 23. Giroscopi <i>super precision gyroscope</i> Font: [23].....	55
Figura 24. Centre de gravetat d'un cub Font:[33]	58
Figura 25. Logotip d'AutoCAD Font: [37].....	59
Figura 26. Concepte de la fixació interior.....	61

Figura 27. Concepte de la rotació en <i>pitch</i>	61
Figura 28. Model digital.....	62
Figura 29. Moviment de <i>roll</i> del giroscopi Font:[12].....	64
Figura 30. Configuració del giroscopis en una embarcació.....	64
Figura 31. Disposició del giroscopis en el model.....	65
Figura 32. Suport dels giroscopis.....	66
Figura 33. Model mecànic	67
Figura 34. Disseny del model digital.....	71
Figura 35. Enclavament a 90 graus dels servo motors.....	71
Figura 36. Disseny del model mecànic	73
Figura 37. Capsa del model analògic	74
Figura 38. Capsa del model digital	74
Figura 39. Instrumentació del model analògic	75
Figura 40. Instrumentació del model digital	75
Figura 41. Model analògic en estàtic.....	76
Figura 42. Model analògic amb escora.....	76
Figura 43. Model digital en estàtic	77
Figura 44. Model digital amb escora	77
Figura 45. Connexions de la IMU MPU 6050 Font: Pròpia	79
Figura 46. Logotip de la MatLab i Simulink Font:[25].....	79
Figura 47. Llibreria complet del <i>Renssealer Arduino Suport Package</i>	80
Figura 48. Blocs del MPU6050 de la llibreria <i>Renssealer Arduino Suport Package</i>	80
Figura 49. Dades extreïdes directament del giroscopi.....	82
Figura 50. Nivell d' <i>offset</i> de la senyal directa del giroscopi	82
Figura 51. Càlcul de l' <i>offset</i>	83
Figura 52. Senyal amb el giroscopi calibrat	83
Figura 53. Blocs de calibrat de la senyal del giroscopi	84
Figura 54. Senyal posterior al integrador, posició angular (<i>roll</i>)	85
Figura 55. Primer ajustament de la senyal, escala de l'ordre 104.....	85
Figura 56. Darrer ajustament de la senyal	86
Figura 57. Comprovació de l'escalat.....	87

Figura 58. Dades extretes directament del bloc de l'acceleròmetre	88
Figura 59. Càlcul per ajustar la senyal del acceleròmetre	88
Figura 60. Acceleròmetre calibrat	89
Figura 61. Relació trigonomètrica Font: [32].....	89
Figura 62. Presa de dades del acceleròmetre	90
Figura 63. Soroll de les dades del acceleròmetre	91
Figura 64. Escalat de la senyal de l'acceleròmetre	91
Figura 65. Configuració de la branca del giroscopi.....	92
Figura 66. Configuració de la branca de l'acceleròmetre	92
Figura 67. Sistema de presa de dades de la unitat IMU MPU6050	93
Figura 68. Angle extret del giroscopi.....	93
Figura 69. Angle extret de l'acceleròmetre	94
Figura 70. Angle a la sortida del filtre amb un 39% de giroscopi i un 61% d'acceleròmetre	94
Figura 71. Senyal de sortida del sistema de sensat	95
Figura 72. Impulsos de control del servo motor Font:[24].....	96
Figura 73. Bloc d'escriptura del servo motor pel simulink	96
Figura 74. Llaç obert de control.....	97
Figura 75. Ona sinusoidal de 40 graus d'amplitud per l'eix de <i>roll</i>	98
Figura 76. Ona sinusoidal de 40 graus d'amplitud per l'eix de <i>pitch</i>	98
Figura 77. Ona escaló de 40 graus d'amplitud per l'eix de <i>roll</i>	99
Figura 78. Ona escaló de 40 graus d'amplitud per l'eix de <i>pitch</i>	100
Figura 79. Comportament del roll davant l'escaló del servo de roll. Funció G11	100
Figura 80. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de roll. Funció G12.....	101
Figura 81. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de roll. Funció G21.....	101
Figura 82. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de pitch. Funció G22	102
Figura 83. Configuració del llaç de control	103
Figura 84. Configuració del MPU sense filtre	104
Figura 85. Configuració del MPU amb filtre	104
Figura 86. Filtre de la senyal del MPU	105
Figura 87. Comparació de la senyal amb filtre i sense filtre.....	105
Figura 88. Configuració del llaç amb control proporcional i retroacció negativa	106

Figura 89. Comportament del controlador proporcional.....	106
Figura 90. Configuració del laç de control amb controlador PI.....	107
Figura 91. Comportament del control PI.....	107
Figura 92. Configuració amb control PID.....	108
Figura 93. Comportament del control PID	108
Figura 94. Pertorbacions sobtades del model digital.....	110
Figura 95. Configuració amb <i>rate limiter</i>	111
Figura 96. Comportament del rate limiter	111
Figura 97. Connexions del model digital	114
Figura 98. Logotip de Fritzing Font: [38]	115
Figura 99. Esquema elèctric del sistema digital	116
Figura 100. Balancing Ball, de la companyia Acrome que farem servir com a sistema de balanceig	117
Figura 101. Sistema de control del sistema de balanceig	118
Figura 102. Prova 1, servomotor a 10 graus	120
Figura 103. Prova 1, servomotor a 20 graus	120
Figura 104. Prova 1, servomotor a 30 graus	121
Figura 105. Prova 1, servomotor a 40 graus	121
Figura 106. Prova 1, servomotor a 50 graus	122
Figura 107. Prova 1, servomotor a 60 graus	122
Figura 108. Prova 1, servomotor a 70 graus	123
Figura 109. Prova 1, servomotor a 80 graus	123
Figura 110. Prova 2, servomotor a 10 graus	124
Figura 111. Prova 2, servomotor a 20 graus	124
Figura 112. Prova 2, servomotor a 30 graus	125
Figura 113. Prova 2, servomotor a 40 graus	125
Figura 114. Prova 2, servomotor a 50 graus	126
Figura 115. Prova 2, servomotor a 60 graus	126
Figura 116. Prova 2, servomotor a 70 graus	127
Figura 117. Prova 2, servomotor a 80 graus	127
Figura 118. Prova 3, servomotor de <i>roll</i> a 50 graus i de <i>pitch</i> a 60	128
Figura 119. Prova 1, servomotor a 10 graus	130

Figura 120. Prova 1, servomotor a 20 graus.....	130
Figura 121. Prova 1, servomotor a 30 graus.....	131
Figura 122. Prova 1, servomotor a 40 graus.....	131
Figura 123. Prova 1, servomotor a 50 graus.....	132
Figura 124. Prova 1, servomotor a 60 graus.....	132
Figura 125. Prova 1, servomotor a 70 graus.....	133
Figura 126. Prova 1, servomotor a 80 graus.....	133
Figura 127. Prova 2, servomotor a 10 graus.....	134
Figura 128. Prova 2, servomotor a 20 graus.....	134
Figura 129. Prova 2, servomotor a 30 graus.....	135
Figura 130. Prova 2, servomotor a 40 graus.....	135
Figura 131. Prova 2, servomotor a 50 graus.....	136
Figura 132. Prova 2, servomotor a 60 graus.....	136
Figura 133. Prova 2, servomotor a 70 graus.....	137
Figura 134. Prova 2, servomotor a 80 graus.....	137
Figura 135. Prova 3, servomotor de <i>roll</i> a 50 graus i de <i>pitch</i> a 60	138

Llistat de Taules

Taula 1. Característiques del servomotor MG996R Font: [24].....	54
Taula 2. Característiques del giroscopi <i>Super precision gyroscope</i> Font: [23]	56
Taula 3. Característiques del motor actuador del giroscopi Font:[23]	56
Taula 4. Característiques del sistema elèctric Font [23]	67
Taula 5. Materials comuns	69
Taula 6. Eines.....	69
Taula 7. Components del model digital.....	70
Taula 8. Components de model analògic	70
Taula 9. Elements construïts del model digital	70
Taula 10. Elements construïts del model analògic.....	72
Taula 11. Passadors de subjecció dels giroscopis.....	73
Taula 12. Característiques del Servomotor Font:[24]	95
Taula 13. Resultats del segon experiment	102
Taula 14. Primer ajustament dels paràmetres del PID de <i>Roll</i>	109
Taula 15. Primer resultat dels paràmetres del llaç de <i>Roll</i>	109
Taula 16. Primer ajustament dels paràmetres del PID de <i>Pitch</i>	110
Taula 17. Primer resultat dels paràmetres del llaç de <i>Pitch</i>	110
Taula 18. Rate limiter per el <i>Roll</i>	112
Taula 19. Segon ajustament dels paràmetres del PID del <i>Roll</i>	113
Taula 20. Rate limiter per el <i>Pitch</i>	113
Taula 21. Segon ajustaments dels paràmetres del PID del <i>Pitch</i>	113
Taula 22. Valors finals del llaç de control	114
Taula 23. Paràmetres de pertorbació de la prova 3 per el sistema digital	128
Taula 24. Paràmetres de pertorbació de la prova 3 per el sistema digital	138
Taula 25. Pressupost inicial del model analògic.....	140
Taula 26. Pressupost inicial del model digital	141

Taula 27. Pressupost inicial total	141
Taula 28. Pressupost final del model analògic	142
Taula 29. Pressupost final del model digital.....	142
Taula 30. Cost de les eines del projecte	142
Taula 31. Cost final dels elements del projecte.....	143
Taula 32. Cost final dels estris empleats per el projecte.....	143

Capítol 1. Introducció

1.1 Motivació

La navegació contemporània ha deixat de ser només un mitjà de transport de mercaderies i persones, actualment també busca el màxim confort a l'hora realitzar aquestes travesses pels mars. És per això i també degut a que certes cargues requereixen un tracte especial, que ha derivat en el fet que hi hagi diverses formes d'estabilitzar embarcacions per poder mantenir el màxim possible la coberta amb una angle estable de 180 graus. Tanmateix en l'article '*Estudio del fenómeno del mareo, desde los factores psicológicos hasta el emplazamiento en el buque*' [3] hi podem trobar varies gràfiques on podem veure el percentatge de gent que es mareja.

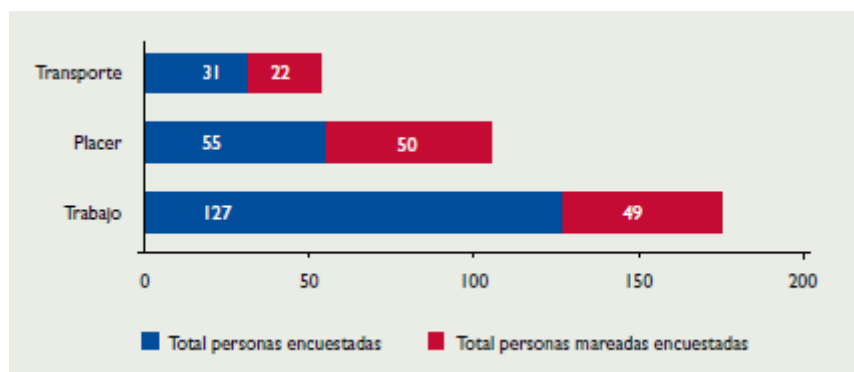


Figura 1. Número de persones marejades en funció del motiu de l'embarcament Font: [3]

Com podem veure en la figura anterior, el 70,97% dels enquestats que s'embarquen com a mitjà de transport es maregen, el 90,91% dels que s'embarquen per plaer també es maregen així com el 38% dels enquestats que s'embarquen per feina. Tanmateix, l'article ofereix la gràfica de la Figura 2 on es veu clarament que el factor psicològic afecta a sucumbir als efectes del mareig.

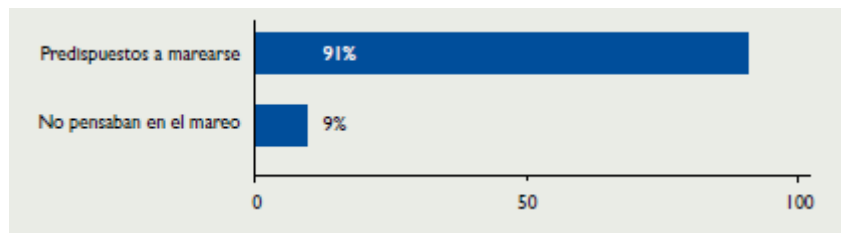


Figura 2. Mareig en funció de la predisposició a estar-ho Font: [3]

Tal com veiem, estar predisposat a marejar-se, es reflexa en que el 91% dels enquestats es maregin, mentre que quan no es contempla la predisposició al mareig, només el 9% en cauen als seus efectes.

Així doncs, una bona forma d'incentivar la no predisposició al mareig del passatge és oferir un servei que proporcioni un estabilitat quasi completa al passatge. I així es com neix la motivació per aquest projecte.

Mètodes com l'ús de perfils hidrodinàmics, túnels de compensació, tancs de llast,... entre d'altres en són algun exemples d'ús actual per intentar mantenir un angle d'escora estable, no obstant, en general, tots aquests sistemes d'estabilització només permeten compensar un grau de llibertat, és a dir, només actuen sobre el capcineig (*pitch*, al voltant de l'eix y) o el balanceig (*roll*, al voltant de l'eix x).

Per aquest motiu, és imperativa la combinació de diferents sistemes d'estabilització per mantenir estable l'embarcació en el pla horitzontal, no obstant, no sempre és possible aconseguir-ho.

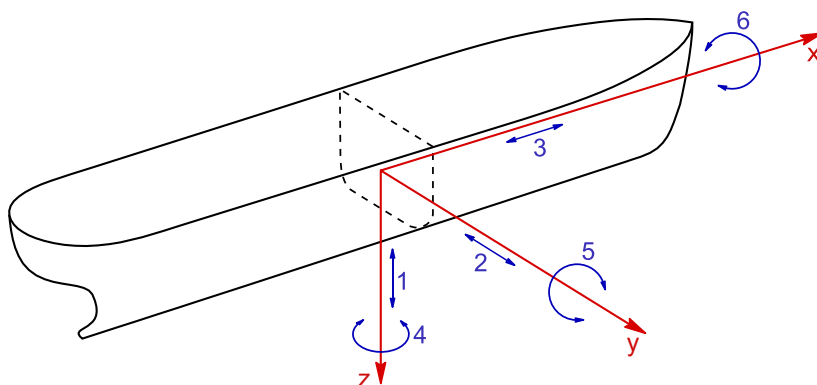


Figura 3. Graus de llibertat en una embarcació. Font: [35]

Per aquest motiu, s'ha escollit el giroscopi com a artefacte estabilitzador, així com la comparació entre quin sistema és millor si utilitzar-lo com a sensor, és a dir, sistema digital, o bé, utilitzant-lo com a massa inercial, sistema analògic.

1.2 Objectius del treball

En aquest apartat exposarem els diferents objectius que pretenem assolir en aquest treball, així com des de quin punt de vista han estat enfocats.

1.2.1 Objectiu principal

L'objectiu principal d'aquest treball és, per mitjà de la construcció de dos models, cada un amb un sistema diferent, obtenir una resposta experimental a la pregunta sobre quin giroscopi és més adient per estabilitzar una embarcació en l'aplicació en l'àmbit marí, si el giroscopi digital o el giroscopi l'analògic.

Remarcar que la finalitat d'aquest projecte no és estabilitzar una embarcació sencera sinó que tant sols es vol compensar l'escora de certs espais dins dels vaixell com poden sales o compartiments on sigui imperatiu mantenir una superfície estable com poden ser quiròfans, espais de càrrega on hagi conseqüències negatives en cas de corriments de la càrrega, entre d'altres aplicacions.

Això comporta no només estudiar quin dels 2 és millor en termes de resultats, sinó que també es posaran sobre la taula aspectes com la dificultat de disseny, implementació i volum incrementat així com el pressupost de cada un dels dos models, per tal de no limitar-lo només als resultats empírics.

1.2.3 Objectius específics

Ara que ja hem definit l'objectiu principal del projecte, detallarem amb més profunditat quin són els objectius específics que permetran assolir l'objectiu principal del projecte.

Disseny:

Per a la realització d'aquest projecte és necessari el disseny de dos tipus de diferents de compartiments amb els seus respectius suports per tal de poder-hi implementar els giroscopis. Per realitzar aquest objectiu s'utilitzarà el programa de disseny per CAD's, (*Computer Aided Design*) que és l'AutoCad.

Tanmateix també s'haurà de realitzar una cerca per trobar els materials idonis per construir els models.

Programació del sistema de control:

Per al giroscopi digital serà necessari trobar un entorn de desenvolupament del sistema de control, així com el llenguatge que utilitzarem per programar-lo. Per aquest projecte es farà servir el MatLab (*Matrix Laboratory*) i la seva extensió Simulink per realitzar els blocs de control i els càlculs previs a ell.

Selecció de la instrumentació i electrònica (model digital):

Per al giroscopi digital serà necessari implementar un circuit electrònic, per això es necessari dissenyar tant els circuits elèctrics com electrònics. A més, caldrà instal·lar servomotors (actuadors), un sensor que mesuri l'angle d'inclinació i un dispositiu de condicionament de senyal entre el model i l'ordinador (arduino).

Selecció de la instrumentació (model analògic):

En el cas del giroscopi analògic serà necessari trobar una sèrie d'elements com podrien ésser rodaments o similars per tal de facilitar el moviment necessari que permeti la compensació que ens proporciona el giroscopi.

Pressupost:

Finalment també serà necessari fer una recerca sobre els aspectes econòmics per tal de no encarir molt el projecte i també per tenir-ho en compte a l'hora d'extreure els resultats finals.

1.3 Planificació del projecte

1.3.1 Guió del projecte

La part de desenvolupament d'aquest projecte el podem dividir en els següents apartats generals:

- Disseny
- Construcció
- Programació del controlador pel giroscopi digital
- Proves
- Valoració

Sabent això podem elaborar un guió a seguir amb les fases del projecte.

1. Disseny

- a. Formes dels compartiments a estabilitzar
- b. Giroscopi analògic
 - i. Ubicació del giroscopi
 - ii. Mecanisme que permeti el moviment
- c. Giroscopi digital
 - i. Ubicació del sistema elèctric i electrònic
 - ii. Ubicació dels actuadors
- d. Sistema energètic
 - i. Emmagatzemen elèctric
 - ii. Connexions
 - iii. Sistema de gestió de l'energia
- e. Disseny del sistema de control del giroscopi digital
- f. Hardware del sistema de control del giroscopi digital
 - i. Microcontrolador
 - ii. Actuadors
 - iii. Sensors

2. Construcció

- a. Disseny gràfic dels elements
- b. Llistat de materials i components necessaris
- c. Obtenció dels materials i components
- d. Muntatge

2.1 Programació del controlador pel control del giroscopi digital

- a. MatLab (MatLab i Simulink) + Arduino
- b. Configuració de la xarxa de comunicació

3. Valoració i Proves

- a. Models adaptats
 - i. Compensació
- b. Banc de proves
 - i. Pertorbació

1.3.2 Diagrama de Gantt del projecte

Degut a conflictes de dates pel SARS COV-2 el diagrama de Gantt del projecte no es correspon amb la realitat, no obstant es mostra la planificació original del projecte per tenir un guia sobre els temps requerits per desenvolupar un projecte com aquest dins del període inicialment plantejat d'un quadrimestre.

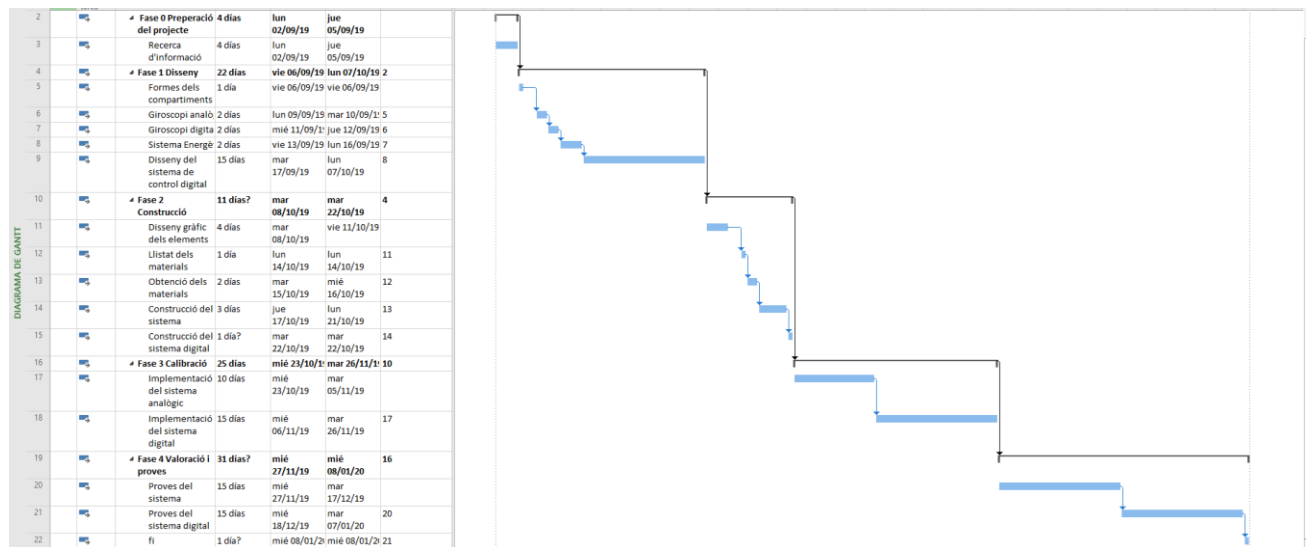


Figura 4. Diagrama de Gantt del projecte plantejat inicialment

1.3.3 Procés de disseny

El procés de disseny d'un projecte és una part fonamental que tot projecte ha de tenir ben definida per tal d'assolir un bon resultat final. És per això que s'ha desenvolupat un espiral de disseny conceptual per assegurar la revisió de cada una de les fases a mesura que és va avançant amb el projecte per tal de mantenir una coherència i funcionalitat òptima del resultat final.

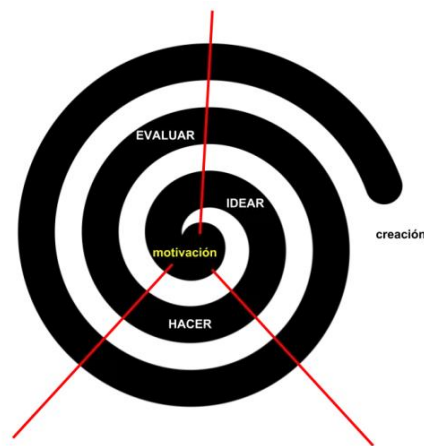


Figura 5. Disseny en espiral

1.4 Organització de la memòria

La present memòria està organitzada de la següent manera:

En el Capítol 2 es presenten els conceptes d'estabilitat i braç adriasant que es faran servir al llarg del treball.

En el Capítol 3 presentem el giroscopi, l'element fonamental d'aquest projecte. Començarem explicant què són i com funcionen, seguit d'una breu explicació dels tipus i aplicacions més comunes incloent en l'àmbit marí.

En el Capítol 4 definim les especificacions generals que han d'acomplir ambdós models i presentem la selecció de la instrumentació que utilitzarem per els dos models, digital i analògic.

En el Capítol 5 presentem les fases del disseny de les estructures d'ambdós models així com la distribució dels elements dins les capses.

En el Capítol 6 presentem les fases de construcció d'ambdós models per tal de poder realitzar les proves.

El Capítol 7 està dedicat al procés de calibrat del sensor, la identificació de la planta i la sintonització del controlador per al sistema digital.

En el Capítol 8 presentem quines proves són les que s'han realitzat així com quin ha sigut el comportament de cada model sobre cada una de les proves.

En el Capítol 9 presentem el pressupost del projecte així com una valoració de costos final.

Al Capítol 10 es presenten les conclusions del projecte.

I, finalment, a l'Annex s'inclouen els plànols d'ambdós models.

Capítol 2. Estabilitat

Per tal de poder valorar si realment els sistemes a dissenyar compleixen amb el seu objectiu, és important tenir unes nocions bàsiques sobre estabilitat, així doncs en aquest apartat en farem una breu explicació.

2.1 Què és l'estabilitat

L'estabilitat és la propietat que han de tenir els vaixells per ser capaços de tornar a la seva posició inicial després de ser pertorbats per una força exterior.

Hi ha diferents tipus d'estabilitat:

- *Estabilitat estàtica*: La podem definir com la condició d'equilibri d'un vaixell resultant del parell de forces al que està sotmès, és a dir, el conjunt de forces que actuen sobre el vaixell en una escora determinada. Dins d'aquest tipus en trobem dues classificacions més:
 - Estabilitat estàtica transversal
 - Estabilitat estàtica longitudinal
- *Estabilitat dinàmica*: La podem definir com la condició d'equilibri resultant del treball efectuat pel parell de forces al que està sotmès el vaixell, és a dir, el treball requerit per adrijar el vaixell des de diferents angles d'escora.

No obstant, generalment, quan es parla d'estabilitat d'un vaixell, fonamentalment s'està parlant d'estabilitat estàtica transversal, que la podem definir com la capacitat de la nau de recuperar la seva posició inicial d'equilibri després de ser pertorbat per una força externa. És a dir, es considera que un vaixell es troba en equilibri inicial, quan el seu centre de gravetat i el centre de carena del vaixell estan alineats a la mateixa vertical, això comporta que tant el pes propi del vaixell, que és aplicat al centre de gravetat, com l'empenta, aplicat al centre de carena, són forces iguals i aplicades a la mateixa direcció però en sentit contrari, quan parlem d'aquesta situació també se'n diu que el vaixell està adrijarat.

2.2 Conceptes bàsics

Per tal de poder seguir amb l'explicació és necessari definir uns quants paràmetres per facilitar-ne el seguiment. A la Figura 6 podem veure representats els següent elements:

Centre de carena C : definim el centre de carena com el centre del volum submergit de l'embarcació.

Centre de gravetat G : definim el centre de gravetat com el centre de tot el volum de l'embarcació.

Metacentre M : definim el metacentre com la intersecció entre la recta que dibuixen el centre gravetat i el centre de carena original amb el centre de carena en situació d'escora.

Altura metacèntrica GM : definim l'altura metacèntrica com la distància entre el centre de gravetat i el metacentre.

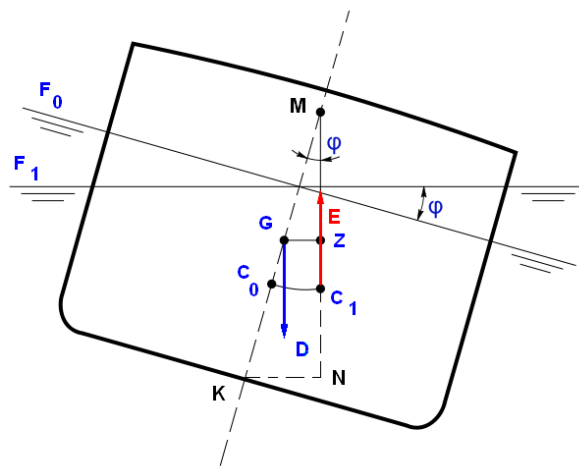


Figura 6. Conceptes clau. Font [29]

2.3 Equilibri

La condició d'equilibri d'un vaixell es compleix quan aquest és capaç de recuperar la seva posició inicial després de ser pertorbat per una força exterior, això implica que el centre de gravetat s'ha de trobar per sota del metacentre (veure **Figura 7**).

Ens trobem diferents classes d'equilibri:

- Equilibri estable, considerem que ens trobem en equilibri estable quan la força que ha pertorbat l'estat inicial ha cessat, i el vaixell és capaç de retornar a la seva posició inicial.
- Equilibri inestable, considerem que ens trobem en equilibri inestable quan la força que ha pertorbat l'estat inicial ha cessat, i el vaixell és incapaç de retornar al seu estat inicial.
- Equilibri indiferent o neutre, considerem que ens trobem en equilibri indiferent quan un cop el vaixell ha perdut la seva posició d'equilibri inicial, aquest adopta un altre tipus d'equilibri.

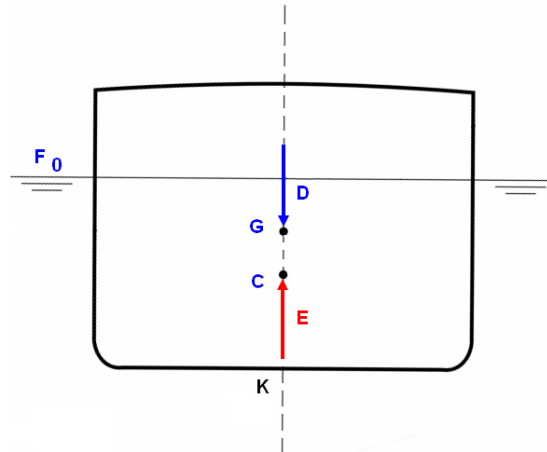


Figura 7. Equilibri inicial Font: [29]

2.4 Estabilitat estàtica transversal

Parlem d'estabilitat estàtica transversal en el moment en que una embarcació es troba adriçada en aigües tranquil·les i tant el seu centre de carena com el centre de gravetat es troben en la mateixa línia vertical coincidint amb la quilla.

Quan una força externa pertorba l'embarcació es produeix una desviació del centre de carena, C , respecte a l'original creant un punt C_1 . En aquesta situació observem una cunya formada entre la línia de flotació i la inclinació que de la coberta que es igual en tant en la part submergida com en la part emergida, (veure la **Figura 6**).

2.5 Braç adriçant

Podem definir el braç adriçant com el moment que permet retornar l'embarcació a l'estat d'equilibri, per tant, és el que volem aconseguir en aquest treball. Definit com a GZ és la diferencia entre el punt G que el trobem a la recta dibuixada pel centre de gravetat G i el centre carena inicial C , i el punt Z que el trobem

a l'altura del centre de gravetat però a la recta dibuixada entre el metacentre M i el nou centre de carena C_1 (veure la **Figura 8**)

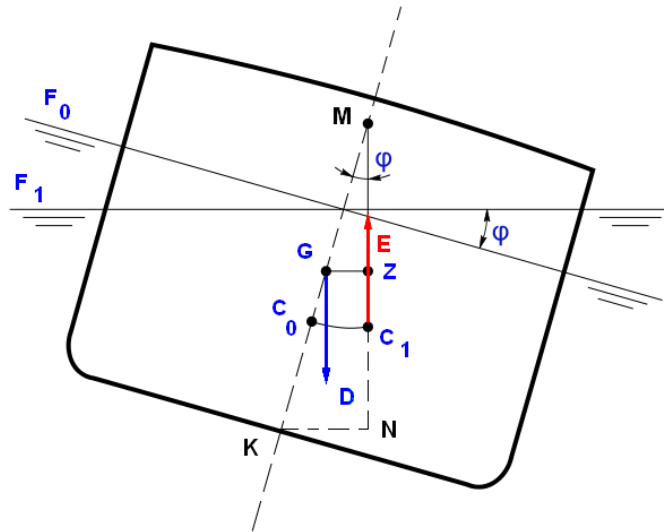


Figura 8. Braç adriasant Font: [29]

El càlcul d'aquest es pot realitzar de varies formes, però per ajudar a la comprensió, podem definir el càlcul com:

$$GZ = GM - \sin(\varphi) \quad (1)$$

Al mateix temps, definim l'altura metacèntrica com:

$$GM = KM - KG \quad (2)$$

D'aquestes formules en podem extreure la conclusió que per a petites escores, com més baix sigui el centre de gravetat, més altura metacèntrica i per tant més braç adriasant.

Capítol 3. Giroscopis

En aquest capítol s'explicarà de forma concisa que és un giroscopi per poder, en capítols posteriors, aplicar-lo en els models desenvolupats en aquest projecte.

3.1 Què és un giroscopi

Un giroscopi és un dispositiu mecànic utilitzat per mesurar, mantenir o canviar la orientació d'un dispositiu o objecte en l'espai. Està format, essencialment, per un cos amb simetria de rotació que gira sobre un eix central, ja que el seu principi de funcionament està basat en la conservació del moment angular [41].

3.2 Com funciona un giroscopi

En aquest apartat veurem en detall els conceptes necessaris per entendre el funcionament d'un giroscopi com a sistema estabilitzador.

3.2.1 Efecte giroscòpic

Per entendre que és l'efecte giroscòpic, suposem que tenim una massa circular sòlida, amb una velocitat de rotació qualsevol. En aquest sòlid l'hi afegim dos suports de tal manera que el podem agafar pel seu eix de rotació fent que cada una de les nostres mans estigui en cada un dels extrems. Si el sentit de rotació és antihorari i el col·loquem verticalment davant nostre, veurem com la part superior del disc s'allunya de nosaltres i la part inferior s'aproxima. En aquest moment pertorbem el seu eix de rotació, de tal forma que la banda esquerra l'aproximem a nosaltres i la dreta l'allunyem. Si fos un sòlid sense rotació, en el moment que exercim qualsevol acció sobre l'eix, resultaria tal i com nosaltres volem, és a dir, allunyant la part dreta i aproximant l'esquerra, però el tenir la massa en rotació, observem que hi ha una variació involuntària del eix de rotació, això és degut al moment angular de rotació i es coneix com a efecte giroscòpic.

Efecte giroscòpic sobre una barra amb 2 masses puntuals

Per entendre millor l'efecte giroscòpic, abans posarem un exemple de masses puntuals, així doncs suposem una barra qualsevol de longitud qualsevol amb dos masses X i amb una articulació central que l'hi permet rotar. En aquest mateix punt central hi considerem un eix de rotació.

Al rotar, observem com tenim una velocitat tangencial Wt a cada un dels extrems, si no apliquem cap pertorbació al sistema, seguirà rotant sense modificar el seu eix de rotació, ja està en equilibri. No obstant, ara suposem que en un punt qualsevol, apliquem una petita pertorbació de forma impulsional tal que provoqui una variació de la velocitat, ΔWt . Això provoca un moment de rotació que altera l'eix de rotació tal i com podem veure a la Figura 9.

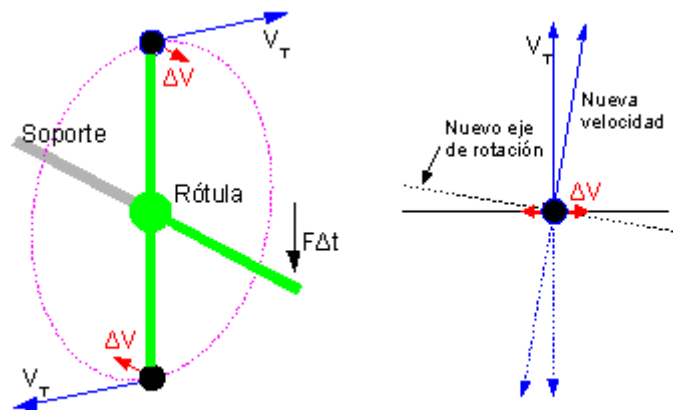


Figura 9. Efecte giroscopi en massa puntual Font: [30]

L'efecte giroscòpic altera l'eix de rotació respecte l'eix original i també sobre el de la pertorbació, fent variar la direcció de la velocitat però mantenint el mòdul d'aquesta.

És important tenir clar què és i com funciona l'efecte giroscopi ja que en un giroscopi no es tracta de 2 masses puntuals com hem estudiat ara, sinó d'una carga uniformement distribuïda per tota la superfície del disc. No obstant l'efecte giroscòpic és igual.

Giroscopi

Ara que ja hem estudiat com funciona l'efecte giroscòpic en una barra de 2 masses puntuals, ja estem preparats per analitzar com funciona sobre un giroscopi. La Figura 10 mostra el comportament d'un giroscopi en rotació on τ és el Par aplicat per pertorbar el sistema i L : és el moment angular de rotació del volant d'inèrcia.

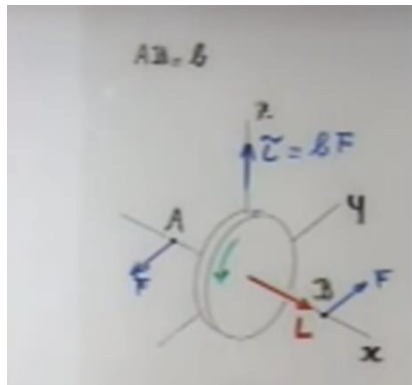


Figura 10. Forces aplicades a un cos en rotació Font: [20]

Com podem veure en la figura anterior, tenim un volant d'inèrcia de massa m , que gira sobre l'eix AB amb una velocitat de rotació ω_s , i fruit d'aquesta velocitat en resulta un moment de rotació angular L en sentit de l'eix X , complint així amb la regla de la mà dreta.

Al moment de pertorbar la posició de l'eix AB en el pla XY , en resulta un moment τ en el sentit de l'eix Z .

Aquest moment provocat per la pertorbació de l'eix AB en el pla XY , es produeix un increment del moment de rotació angular del volant d'inèrcia, dL , que el podem definir, gracies a la segona llei de newton per objectes en rotació, com $dL = \tau \cdot dt$.

Això ens permet deduir el comportament general de sistema, i és que degut a la inclinació del volant i els moments aplicats sobre el seu eix de rotació, el moment de rotació angular del volant d'inèrcia sempre tendirà en la direcció del par aplicat. Degut a aquesta afirmació quan cedeixi el par aplicat, el sistema tornarà al seu estat d'equilibri.

3.2.2 Precessió

Per entendre què és el moment de precessió, suposar que agafem una baldufa i la fem rotar sobre el seu eix vertical i deixem que transcorri el temps, en un principi veurem com pràcticament rotarà completament vertical al seu eix, però degut a la fricció i d'altres efectes externs, anirà desaccelerant i disminuint la seva freqüència de rotació. En aquest punt veurem com l'angle de l'eix rotació va augmentant respecte l'original al mateix temps que dibuixa una circumferència en la part superior. Aquest efecte és conegut com precessió (veure la Figura 11).

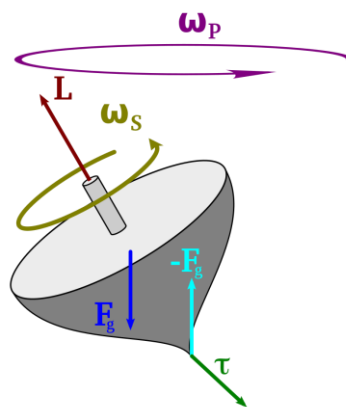


Figura 11. Efecte de precessió Font: [36]

Ara que ja tenim una idea conceptual del que és la precessió estudiarem el seu funcionament, primerament suposem que la pertorbació del l'eix AB , enlloc d'ésser en el pla XY , és en el pla XZ . Al igual que abans L tendirà a τ , i en aquest cas l'efecte es veurà en el pla horitzontal XY . A Aquest fenomen l'anomenen precessió giroscòpica (veure la Figura 12).

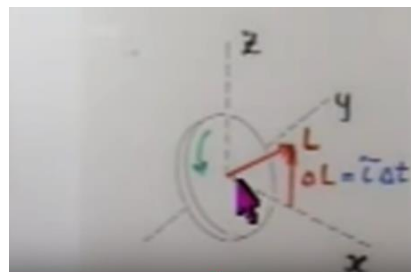


Figura 12. Representació de la tendència dels moments quan es pertorba el sistema Font: [20]

Per entendre millor l'efecte de la precessió d'un giroscopi, podem aplicar la segona llei de Newton per objectes sòlids amb rotació.

$$dL = \tau dt \quad (3)$$

$$L = I W_s \quad (4)$$

$$\tau = rmg \quad (5)$$

$$dL = \tau dt = rmg dt \quad (6)$$

El terme rmg és el mòdul del moment respecte el punt de pivot, llavors si dividim ambdós costats de la igualtat pel moment de rotació angular L , ens resulta la següent equació.

$$d\beta = \frac{dL}{L} = rmg \frac{dt}{L} \quad (7)$$

Hem igualat els dos costats de l'equació al diferencial de l'angle generat per el moviment de precessió, $d\beta$.

Apliquem la forma de la freqüència angular $W = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, i definint W_s com la freqüència angular de rotació i W_{pre} com la freqüència angular de precessió, i obtenim:

$$W_{pre} = \frac{d\beta}{dt} = \frac{\tau}{L} = \frac{rmg}{I W_s} \quad (8)$$

Finalment posarem un últim apunt per entendre el concepte de precessió, suposem la situació on tenim el volant d'inèrcia amb freqüència angular W_s , subjectat per un extrem a un cable vertical i per l'altre tenim total llibertat de moviment.

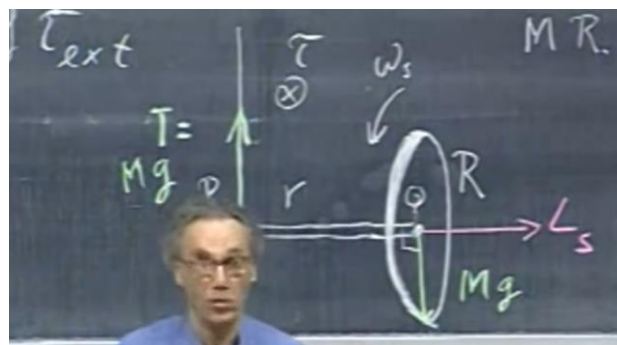


Figura 13. Cos inercial en rotació subjectat per un sol punt, prof. Walter Lewin Font: [20]

El pensament intuïtiu ens dicta que el cos hauria de caure però degut a la precessió giroscòpica angular el cos rota sobre el cable, ja que tenim un sistema amb forces totalment equilibrades i un sumatori de moments que obliga a la rotació del sistema sempre que el volant d'inèrcia segueixi girant, aquest no caurà mentre és compleixin les condicions.

Això porta a pensar la possibilitat d'aplicar una força a l'extrem lliure. Al aplicar-la incrementem el moment τ , i com podem veure a l'equació (7) augmenta la freqüència angular de precessió i per tant el període T disminueix, ja que per definició és $T = \frac{2\pi}{\omega_{pre}}$.

En aquest efecte és on rau l'interès del giroscopi com a instrument de conservació angular i direcció, si que és cert que qualsevol objecte en repòs és capaç de mantenir l'angle i orientació en determinades situacions, no obstant, el giroscopi és l'únic que admet grans moments de pertorbació i mantenir la referència de direcció, ja que al aplicar-se el moment, aquest comença precessar com hem vist en l'equació (8), fins que el moment és cessat. En aquest moment també s'interromp la precessió, i el que en un objecte en repòs hagués suposat la pèrdua de la direcció degut al moment, en un giroscopi això no passa ja que, degut a la naturalesa de l'efecte giroscòpic, els moments paràsits romanents del moment pertorbació no tenen tant efecte sobre ell. I en cas de que fos necessari es podria augmentar el moment d'inèrcia i la freqüència de rotació per disminuir encara més els efectes dels moments paràsits, tal com hem vist en la Figura 13.

3.2.3 Nutació

De la mateixa manera que hem fet amb el fenomen de la precessió, per entendre la nutació suposarem que tenim la mateixa baldufa i partirem de la situació en que ja ha començat la precessió. Si fem una petita pertorbació a l'eix de rotació podem observar com a part de precedir, dibuixa un patró oscil·latori superposat al de la precessió. El fenomen que hem provocat és el de nutació.

Un que ja tenim la idea conceptual de la nutació, podem definir-la com el moviment irregular de l'eix de rotació en objecte simètric en rotació sobre el seu eix central, és a dir, la precessió la podríem definir com una nutació nul·la i constant en el seu primer angle durant un interval de temps.

Per entendre-ho millor, aquest cop, suposarem que tenim un giroscopi i una pesa de massa m que serà superior a la massa del giroscopi per tal de poder entendre bé l'efecte, ambdós objectes estan units entre si per un eix, entre mig hi ha un punt de pivot que permet canviar l'angle respecte l'horitzontal per equilibrar el pes del giroscopi en rotació i la massa. En un principi, degut a que el pes de la massa és major, el sistema s'inclinarà cap a la massa m , per tal de poder assolir un punt d'equilibri. Al mateix temps el sistema començarà a precedir, arribarà un punt amb un angle α , que serà el punt d'equilibri on hauria de

parar-se el sistema per esta completament estable i només tenir el moviment de precessió, es a dir, nutació nul·la. Però degut a que el cos portava una velocitat v , per aconseguir l'angle α , aquest no pot parar-se de cop i sobrepassarà l'angle òptim, això resulta en que hagi de descendir per tornar a l'angle desitjat però degut a que també porta una velocitat determinada i una acceleració no nul·la, es tornarà a passar el punt. A aquest fenomen que ens recordaria als harmònics simples, el coneixem com a nutació.

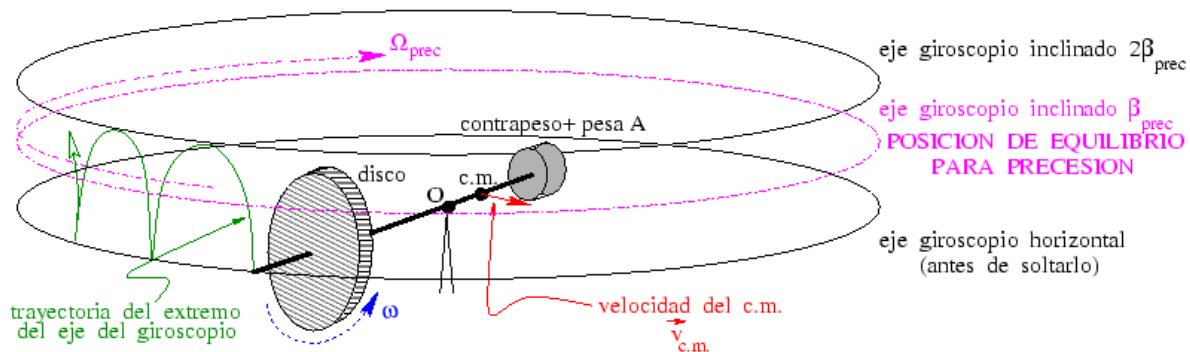


Figura 14. Efecte de nutació Font: [5]

La nutació no és un fenomen desitjat pel que és vital equilibrar els sistemes abans de posar-los en funcionament ja que, aquest fenomen comporta un gran error de conservació de la direcció i per tant fa que el giroscopi perdi gran part del seu interès. Per equilibrar el sistema i evitar la nutació el que es fa actualment es fer un estudi exhaustiu dels moments i forces aplicades al giroscopi per tal tenir-lo sempre equilibrat.

3.3 Tipus de giroscopis

Actualment hi ha una gran varietat de giroscopis, aquí en veurem els més destacats i utilitzats, classificats en varies famílies en funció del seu principi de funcionament. Així doncs en aquest apartat explicarem quins tipus, variants i característiques ens podem trobar en cada un d'ells per tenir una idea sobre quins tipus de giroscopis en podem trobar al moment de començar una recerca per implementar-los als nostres projectes. [26,27,28]

3.3.1 Giroscopi mecànic (analògic)

El giroscopi analògic és segurament, el primer que a un l'hi ve al cap al pensar en giroscopi, doncs són els més comuns per estudiar el funcionament d'aquests, així doncs en aquest apartat veurem algun tipus de giroscopis mecànics que ens podem trobar.

Gyrostat

Possiblement els tipus de giroscopi més comú i conegut per la gent, està basat per un volant o disc massís encapsulat en un Cardan que en permet llibertat de moviment ens els 2 eixos, de forma que pot adoptar molts angles diferents i precedir de varies formes.

El punt fort d'aquest tipus de giroscopi és la poca infraestructura que requereix per a la seva implementació ja que només requereix d'un suport on encapsular-lo.

Gas bearing

En aquest tipus de giroscopis, els rotor està encapsulat en una cambra pressuritzada per tal de reduir la fricció deguda a la pròpia rotació. Aquest permet pràcticament els mateixos graus de llibertat que el *gyrostat*, amb l'afegit que degut a la no fricció permet mantenir el moment angular molt més temps i amb més precisió que d'altres sistemes, però amb l'inconvenient que requereix tenir una instal·lació molt més complexa i, per tant, subjecte a errors.

HRG (Hemispherical Resonator Gyroscope)

Consta d'un semi cercle encapsulat en cobertura que permeti captar les ressonàncies, ja que està controlat per forces electrostàtiques que generen reaccions a la ressonàncies. D'aquesta forma es capaç de captar les inèrcies dels objectes del seu voltant, ja que rep les ones que aquests emeten.

Tot i ser un dispositiu mecànic, no disposa de cap part mòbil, ja que la seva funcionalitat rau en les vibracions del semi cercle, fent que es pugui compactar fins a nivells interessants per aplicacions on sigui vital ocupar poc volum.

DTG (Dynamically tuned gyroscope)

Consta d'un rotor suspès sobre un conjunt de punts de pivot flexibles. La flexibilitat dels motlles són independents de la velocitat de gir, cosa que permet que la inèrcia dinàmica del Cardan proporcioni una rigidesa negativa dels motlles proporcional al quadrat de la velocitat de rotació. Per tant al assolir la denominada velocitat de sintonització, els moments exercits sobre el rotor, es cancel·len, fent d'aquest assolir una condició ideal de l'efecte giroscòpic.

3.3.2 Giroscopi digital

Ara és el torn de citar alguns tipus de giroscopis digitals o MEMS amb les seves sigles en anglès (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*), la característica que diferencia aquest tipus de giroscopi dels darrers, és que degut a que són equips electrònics poden assolir rangs que van dels centímetres fins al micròmetres. El seu funcionament rau en el principi que estipula que qualsevol cos en vibració tendeix a seguir vibrant en el seu pla, sempre que no sigui pertorbat. Conseqüència d'això és que si es canvia la orientació del suport d'aquest cos, aquest exercirà un moment de rotació.

VSG o CVG

Vibrating structure gyroscopes o *Coriolis vibratory gyroscope* són les seves sigles en anglès, és pot trobar com a giroscopi d'estructura vibrant, tal com hem vist en l'anterior definició és tracta d'un dispositiu MEMS. El seu principi de funcionament està basat en halteris dels insectes, i gràcies a l'efecte Coriolis els moments de rotació deguts a la rotació del pla de suport, permeten mesurar la magnitud d'aquests, i aquesta és la raó del seu segon nom.

3.3.3 Ring Laser Gyroscope

Ring Laser Gyroscope o giroscòpi d'anell làser, consisteix en un làser que té contra manadors independents entre ells que comproven l'angle del raig làser, per mitja del modes de ressonància. El trobar aquesta diferència de freqüència es pot calcular la rotació que està adquirint el cos, a aquest efecte se'l coneix com efecte Sagnac.

3.3.4 Giroscopi òptic

Aquest tipus de giroscopis utilitza la fibra òptica com mitjà de transmissió per analitzar la interferència de la llum i així detectar la rotació mecànica del objecte al qual està instal·lat. Consta bàsicament de 2 parts, ambdues estan oposades i em bobinades en fibra òptica, com mesura la ressonància fa servir el mateix mètode que el giroscopi d'anell làser, l'efecte Sagnac.

3.4 Aplicacions del giroscopi

Les propietats intrínseques del giroscopi fa que tingui un gran ventall d'aplicacions pràctiques, així doncs en aquest apartat en veurem les 4 més utilitzades per complementar el punt anterior i així tenir més fàcil l'elecció del giroscopi pel nostre projecte.

3.4.1 Girocompàs

El girocompàs és l'alternativa no magnètica a la brúixola, ja que és de coneixement general que aquesta és víctima de les forces magnètiques de la Terra i d'altres elements generadors de camps electromagnètics. És per això, que el giroscopi n'és el candidat perfecte per aquesta funció, al no ser pertorbat per elements ferromagnètics permet la seva implementació en gran varietat de modalitats. Basat amb els giroscopis mecànics del tipus *gyrostat*, consta d'un disc en rotació que amb la combinació de la rotació, en aquest cas, terrestre i fent ús de l'efecte de la precessió giroscòpica, és capaç de trobar una direcció geogràfica de forma automàtica.

Degut això un dels usos més comuns és per al navegació, ja sigui terrestre, marítima, aèria o especial, ja que és capaç de trobar el verdader nord, considerat el nord respecte l'eix de rotació de la Terra, axial.

3.4.2 Indicador d'angles

Conegut com a HI, de *heading indicator*, la seva aplicació és basa fonamentalment en l'aeronàutica. Gràcies un altre cop a la precessió giroscòpica, aquest instrument permet calcular l'angle en el que es troba el seu pla respecte el pla terrestre (en les altures en les que es mou un avió és pot negligir la curvatura terrestre per aquesta aplicació). Així doncs consta d'un giroscopi en posició vertical respecte el pla terrestre, encapsulat en un subjecció del tipus Cardan, amb una configuració concreta d'engranatges permet no només trobar el nord respecte l'eix axial terrestre, sinó també indicar l'angle ja sigui de *pitch* i *roll* que té l'artefacte al que ha estat muntat.

3.4.3 Estabilitzador

L'estabilització giroscòpica és l'ús en el que ens centrarem nosaltres, així doncs la seva aplicació és molt àmplia ja que és pot emprar per estabilitzar suports de càmeres o steadicam, per estabilitzar plataformes,... La configuració general per estabilitzar els 2 graus llibertat és de dos 2 giroscopis, ja que cada un només pot aplicar un par estabilitzador en un sentit, per aconseguir aquest par fa ús un altre cop

de l'efecte de la precessió giroscòpica, que amb combinació amb el moment generat per la rotació del pla, genera un moment estabilitzador que permet estabilitzar el pla.

3.4.4 Combinació amb d'altres elements

La combinació amb d'altres elements és molt comuna, especialment que parlem de giroscopis del tipus MEMS. L'ús més generalitzat és amb combinació amb un acceleròmetre, per a la mesura d'angles a partir de velocitats de gir, proporcionades pel MEMS i d'acceleracions, proporcionades per l'acceleròmetre.

Aquesta configuració té un alt grau d'implementació, ja que degut a que és un dispositiu electrònic es poden reduir molt les dimensions i el pes respecte a model mecànics i això ha facilitat la seva implementació en molts sistemes digitals, com la telefonia mòbil, dispositius de radio control, entre d'altre aplicacions que, com hem dit, requereixin d'elements de mesura d'angles sense ocupar gaire espai.

3.5 Giroscopi en l'àmbit marí

En aquest apartat ens centrarem en l'ús del giroscopi en l'àmbit marí, com ja hem vist en els punts anterior, les aplicacions d'aquest comprenen un gran ventall de possibilitats, i en l'entorn marí en podem trobar 3 d'elles, com a indicador d'angles, com a girocompàs i finalment com a estabilitzador que és en el que ens centrarem en aquest treball.

3.5.0 Història del giroscopi com estabilitzador d'embarcacions

Primer però, farem un breu repàs pels orígens del giroscopi en l'àmbit marí ja que sempre és sempre important saber els passos que han conduït al que coneixem a dia d'avui. Així doncs tot va començar a finals del segle XIX principis del XX, quan l'exercit americà va dissenyar el primer vaixell de grans dimensions en tenir estabilització giroscòpica, el USS Henderson. Els seus enginyers coneixien la seva propietat de precessió, i varen veure que al col·locar-lo sobre una embarcació i aquesta rebre el moment de les ones, aquests exercien un moment adriant que controlava el *roll* del vaixell. Així va ser com l'any 1917, va ser botat el primer vaixell en incorporar el sistema d'estabilització giroscòpica.

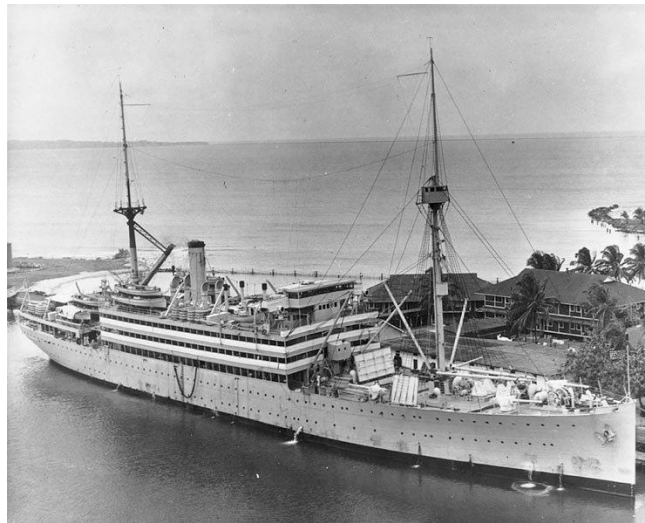


Figura 15. USS Henderson Font: [13]

Els giroscopis del USS Henderson eren 2 masses de 25 tones cada un d'ells, muntats a la part central de l'embarcació, coincidint amb el centre de masses de l'embarcació. Ambdós assolien un velocitat de rotació de 1.100 rpm accionats per un motor elèctrics AC de 75 hp.

El sistema no tenia gaire aplicació en aquell moment i no va ser fins els anys 30 que la naviliera *Lloyd Sabaudo* veia com les embarcacions de la seva competència *White Star Line* tenia creuers cada cop més ràpids que el seus. Això va impulsar el disseny d'embarcacions que poguessin assolir cada cop velocitats més elevades, no obstant es van adonar d'un gran problema que comportava l'augment de nusos, i era la inevitable inestabilitat que adoptava l'embarcació al navegar. En aquell moment hi havia ja sistemes d'estabilització mitjançant perfils hidrodinàmics que permetien controlar el *roll* del vaixell quan aquest assolia suficient velocitat per poder-se valdre de l'extra de sustentació que aquests aportaven a l'embarcació.

El enginyers de la *Lloyd Sabaudo* però, van optar per un nou i revolucionari sistema d'estabilització, el giroscopis, que havia implementat l'exèrcit americà per el seu vaixell de transports USS Henderson. Així va ser com el primer creuer amb estabilització giroscòpica va ser botat l'any 1931 amb el nom de SS Conte di Savoia, equipat amb 3 giroscopis de 108 tones cada un d'ells.



Figura 16. SS Conte di Savoia Font: [11]

Lavors això ens planteja la següent pregunta, si realment són tant bons aquests sistemes d'estabilització, perquè no s'han seguit implementant durant els anys següents?

El problema fora que el sistema no va complir amb les expectatives tot i que si que aconseguia disminuir amb gran quantitat el moviment de *roll* de l'embarcació disminuint el període, això mateix provocava que fos un vaixell molt 'tou'. El mantenir l'escora en els extrems degut a la disminució del període de *roll*, feia que al mateix temps fos perillós, per aquesta raó, en el creuer SS Conte di Savoia durant les travesses cap a l'Est el sistema era desconnectat perquè hi ha molta de vent i mar a favor del vaixell, mentre que en les travesses cap a l'Oest el sistema si que podia ésser utilitzat degut a la disminució dels efectes anteriors.

Ara, tenint les nocions bàsiques sobre la història de la implementació del giroscopi en el món del mar, ja en podem veure les seves aplicacions.

3.5.1 El giroscopi com a indicador d'angles en l'àmbit marí

Segurament l'ús menys conegut del giroscopi dins del sector naval, doncs la seva funció normalment la desenvolupa un clinòmetre, ja que el seu funcionament és molt més bàsic no obstant, quan es vol ser més acurat amb els angles mesurats, s'ha d'optar per el giroscopi.

Utilitzat generalment en la seva modalitat MEMS, el podem trobar en combinació amb acceleròmetres en artefactes submarins no tripulats, tant mateix, també el podem trobar en la seva modalitat mecànica en artefactes submarins tripulats.

3.5.2 El giroscopi com a girocompàs en l'àmbit marí

L'ús més antic del giroscopi en el món de la navegació és el de girocompàs o compàs, ja que degut a les propietats anteriorment esmentades, aquest és el candidat idoni per a la navegació.

En aquest cas sempre és utilitzat el tipus de giroscopi mecànic, ja que la precessió giroscòpica només es present en dispositiu mecànics.

3.5.3 El giroscopi com a estabilitzador en l'àmbit marí

Fins a l'arribada del giroscopi com mètodes estabilitzador, es feien servir els sistemes esmentats anteriorment i per tant era imperatiu el moviment de l'embarcació per poder notar els efectes dels estabilitzadors. Tanmateix aquests sistemes oferien una resistència a l'avanç que els giroscopis no tenen, per tant, a favor del giroscopi és tradueix en més rendiment i menys consum. És per això que la seva implementació va ser en el seu moment una tota revolució.

Funcionament del sistema d'estabilització giroscòpica

El funcionament de l'estabilitzador giroscòpic està basat en utilitzar un giroscopi mecànic del tipus *gyrostat*, això vol dir, que és tracta d'un sistema d'estabilització activa, és a dir, que és dur a terme fent un canvi de masses o control de superfícies.

Com ja hem dit abans utilitza el moviment de *pitch* o *roll* del vaixell combinat amb el moment angular del propi volant d'inèrcia per causar un moviment oscil·lant. Al mateix temps la combinació del moviment oscil·lant amb el moment angular crea un parell estabilitzador, que degut a que és completament oposat al moviment causat per les ones sobre el vaixell, aquest compensa el moviment de l'embarcació. És important que el pes del rotor, sigui entre un 3% i 5% el pes total de la massa a estabilitzar per tal d'aconseguir el moment desitjat.

El fet de que sigui necessari el moviment del vaixell per iniciar el funcionament i que tot el procés es completament simultani, ofereix una estabilització instantània que altres mètodes digitals no poden oferir.

Ens podem trobar 2 tipus diferents de configuració giroscòpica per estabilitzar el vaixell:

Eix de rotació vertical

En aquest tipus de configuració ens trobem l'eix de rotació vertical, de forma que el disc en aquest cas rotarà horitzontalment. Quan l'embarcació rebí el moment de les ones, el moviment de precessió farà que el giroscopi roti sobre l'eix de suport horitzontal, creant el par escorant que estabilitza l'embarcació, veure la Figura 17.

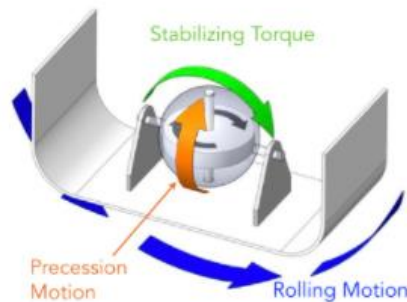


Figura 17. Eix de rotació vertical Font: [12]

Eix de rotació horitzontal

En aquesta configuració a diferència de l'anterior, ens trobem l'eix de rotació horitzontal, per tant tenim el giroscopi rotant en horari. Al rebre el moment produït per les ones, el que farà és que començarà a precedir rotant sobre el suport i generant així el par escorant que estabilitzarà l'embarcació. Val a dir que aquesta configuració requereix de menys volum que l'anterior però té una instal·lació més complexa, veure la Figura 18.

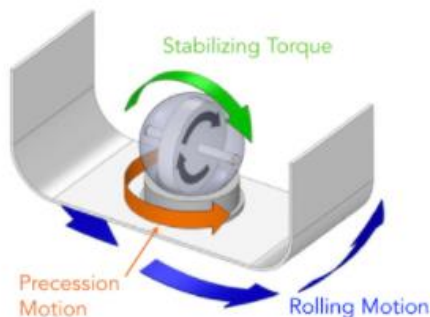


Figura 18. Eix de rotació horitzontal Font: [12]

Els fabricants actuals d'estabilitzadors giroscòpics marins, com VEEM, Seakeeper, Orbit Gyro entre d'altres, ofereixen més opcions de control sobre el giroscopi. A continuació les veurem per tenir poder definir una mica més quina serà la nostra configuració.

Efecte de precessió controlat o natural

Com ja s'ha explicat anteriorment el moviment de precessió és un fenomen intrínsec del giroscopi, per tant podem dir que és natural. Si no exercim cap tipus de control, tindrem el moviment de precessió completament sincronitzat amb el *roll* que adopta el vaixell, cosa que va molt bé ja que no requereix de cap tipus de control i per tant en podem eliminar els possibles defectes i retards propis d'aquests tipus de sistemes. No obstant hi ha el problema que quan ens trobem davant sistemes amb llargs períodes de *roll*, quan aquests són afectats per petites pertorbacions, potser que la precessió natural no respongui o ho faci inadequadament.

És per això que parlem de control de l'efecte de precessió, amb aquest control podem evitar tenir aquesta banda morta i assegurar que el giroscopi actuï de forma eficaç en tots els rangs d'escora. Al mateix temps però estem agregant dispositius de control que són susceptibles a errors i retards al mateix temps que encareixen el sistema.

Sistema de control actiu o passiu de la precessió

Actualment la gran majoria de sistemes d'estabilització moderns compten amb un sistema de control de precessió actiu. Això ha suposat un gran avantatge respecte el sistemes de control passius, que són aquells on és configura el sistema de control durant la seva instal·lació i no té cap tipus d'adaptabilitat.

El sistema de control actiu, és un mètode adaptatiu per tant adapta la precessió del giroscopi a l'entorn per tal d'assolir un rati encara mes ampli d'amplitud d'ones de forma que es va ajustant a les condicions de la mar per garantir que la precessió sempre sigui efectiva i evitar cap tipus de banda morta.

3.4.4 El giroscopi en el món real com a sistema d'estabilització marítima

Com hem vist en apartats anterior, hi ha molts tipus de giroscopis, configuracions i sistemes de control de precessió, no obstant en la pràctica s'acostumen a utilitzar del tipus mecànic, *gas bearing*, ja que els que permet un major control de la precessió i millor rendiment respecte els demes.

D'altres giroscopis, com MEMS no són utilitzats per estabilitzar embarcacions completes ja que requereixen d'una infraestructura d'actuadors que no són necessaris en giroscopis mecànics que utilitzin el par angular per crear el par estabilitzant, cosa que els posa en molta desavantatge respecte aquests.

Actualment empreses *VEEM*, *Seakeeper*, *Orbit Gyro*,... anteriorment citades implementen aquests tipus d'estabilització en la nàutica recreativa, inclouen des de petites embarcacions de 15 metres fins a megaiots de 150 metres, el principi de funcionament és el mateix.

L'elecció d'aquest sistema d'estabilització és degut a que compleix amb el requisits de comoditat i confort que demanden aquest tipus d'embarcacions, i degut al seu principi de funcionament pot ser ubicat en varies parts del vaixell sense comprometre la seva efectivitat, no obstant el gran inconvenient i el motiu general pel qual no veiem aquest sistema d'estabilització en gran embarcacions de passatge, és degut el volum i al innegable increment de pes que suposa la seva instal·lació. Degut això les navilieres, que treballen en mercats on la màxima és tenir el màxim de capacitat de carga amb el menor pes, opten per altres sistemes d'estabilització que segurament no són millors que el giroscopi, però no requereixen de la infraestructura d'aquests.

Capítol 4. Especificacions i selecció de la instrumentació

En aquest capítol s'estableixen les especificacions que han complir ambdós models i es presenten tots els components i hardware que s'han seleccionat per a la instrumentació dels models d'aquest projecte, un amb estabilització giroscòpica digital i l'altre amb estabilització giroscòpica mecànica.

4.1 Definició d'especificacions

En aquest apartat definim els objectius que ambdós sistemes d'estabilització han de complir per tal de donar per vàlid el resultat final i així poder extreure'n conclusions més acurades.

Especificacions

Els objectius comuns que han de complir ambdós models són:

- Ambdós models han de tenir les mateixes dimensions, 20x20x20 cm, articulacions a part, per tal de poder valorar de forma més justa els resultats.
- Capacitat de compensació en els dos graus de llibertat, és a dir, que compensin escores i trimat del vaixell de manera indiferent.
- Temps d'establiment a 4 segons, no hi posem un temps inferior ja que les pertorbacions que intentem emular són les ones del mar per a grans embarcacions.
- Assolir un mínim de correcció de 20 graus per a cada banda dels graus de llibertat.
- Error nul en règim permanent, és a dir, com a resposta a la pertorbació el sistema ha de recuperar 0 graus de *roll* i 0 graus de *pitch*.

4.2 Instrumentació per al model digital

Per a aquest projecte entendrem per sistema digital, aquell sistema o model que utilitzi giroscopi digital, en particular del tipus MEM's com a sistema principal per estabilitzar, ajudat per actuadors que segueixin les seves directrius per desenvolupar correctament l'estabilització del model.

Els elements escollits són:

- Placa Arduino MEGA
- IMU MPU 6050
- Dos Servo motor MG996R
- Ordinador amb el MatLab i Simulink
- Cablejat

Placa Arduino MEGA

La placa Arduino MEGA és una placa basada en el microcontrolador ATmega2560, consta de 54 entrades/sortides digitals de les que 15 en són del tipus PWM. També hi podem trobar 16 entrades analògiques, 4 UARTS, un cristall de 16Mhz, connexió USB, jack per a alimentació DC, connector ICSP i un botó de *reset*.



Figura 19. Placa Arduino Mega Font: [39]

Hem escollit aquesta placa perquè a part de ser un dispositiu molt versàtil i de preu competitiu, disposa de moltes llibreries que permeten les connexió entre la placa i MatLab o Simulink, cosa que ens facilitava molt la implementació del model i també es troba dins del protocol de connexió I2C entre la placa i els seus perifèrics.

IMU MPU 6050

La IMU (*Inertial Measurement Unit*) és una unitat de mesura inercial, és a dir, un dispositiu amb la funció de mesurar i registrar la informació obtinguda deguda als efectes inercials que actuen sobre ella, que són la velocitat, orientació i acceleració.

Aquesta IMU MPU 6050 consta de 2 parts disposades de forma ortogonal: un giroscopi i un acceleròmetre, que juntes permeten obtenir sistemes de fins a 6 graus de llibertat, 3 acceleracions angulars i 3 velocitats angulars, tot i que poden arribar a ser 9 graus de llibertats utilitzant manòmetres.



Figura 20. IMU MPU 6050 Font: [40]

El motiu pel qual hem utilitzat aquest sensor és perquè es comunica a través del protocol de connexió I2C que permet la seva monitorització amb MatLab de manera directa amb la llibreria *Rensselaer Arduino Support Package*. Font: [32]

Servomotor MG996R

Anomenem servomotors o servos a aquells dispositius d'accionament per al control de precisió de velocitat, moment i posició.



Figura 21. Servomotor MG996r Font: [24]

En el seu interior, apart d'una configuració específica d'engranatges de transmissió, ens podem trobar un *encoder*, encarregat de convertir el moviment mecànic en impulsos elèctrics interpretats per un control de moviment i viceversa. També hi podem trobar un *driver* o controlador que amb conjunt amb l'*encoder* ens permet controlar la posició, parell i velocitat del servomotor.

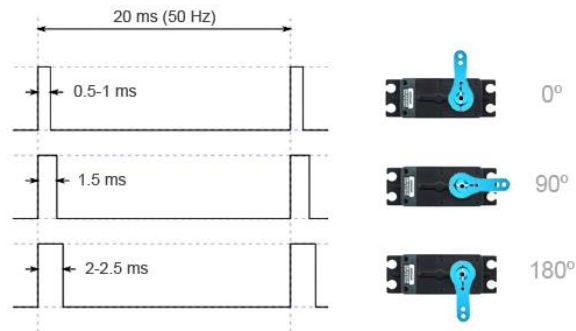


Figura 22. Impulsos de control d'un servomotor Font:[24]

Tal com veiem en la imatge anterior, el servo controla el seu angle per mitjà de la duració dels impulsos que rep del controlador.

El motiu pel qual hem escollit aquest servomotor és perquè és més gran que els demés (dins d'aquest tipus de servomotors per a l'electrònica) i per tant també permet tenir més parell per moure el mecanisme que necessitem.

Les principals característiques són les següents:

Moment	13kg·cm	4,8 V	15 kg·cm	6V
Velocitat	0,17s/60º	4,8 V	0.13s/60º	6V
Arc de gir	120º (60º en cada direcció)			
Banda morta	$5 \cdot 10^{-6}s$			

Taula 1. Característiques del servomotor MG996R Font: [24]

Nosaltres treballarem en 5V, que és la sortida que en proporciona la placa d'Arduino MEGA.

Ordinador amb el MatLb i Simulink

Per a la realització del model digital, necessitarem un ordinador amb els programes MatLab i Simulink per tal de poder realitzar les proves convenientes.

4.3 Instrumentació per al model analògic

En contraposició al sistema digital, el sistema analògic o mecànic, és aquell que utilitza un giroscopi mecànic per desenvolupar les funcions estabilitzadores.

El elements escollits són:

- Dos Super precision gyroscope
- Motor elèctric

Super Precision Gyroscope

El giroscopi escollit per al nostre treball és mecànic del tipus *gyrostat*, ja que té un pressupost més assequible que d'altres tipus de giroscopis com el *Gas bearing gyroscope* que segurament seria millor per aquest projecte, ja que al tenir el volant d'inèrcia al buit les pèrdues per fricció són molt quasi nul·les .



Figura 23. Giroscopi *super precision gyroscope* Font: [23]

No obstant hem escollit aquest model '*super precision gyroscope*', perquè tot i ser més senzill disposa de característiques molt interessants (veure Taula 2):

RPM	12000 rpm
Pes	
Pes Total	345 g
Pes del disc	111.2 g
Dimensions	
Diàmetre total	62,5 mm
Diàmetre del disc	53 mm
Espessor del disc	12 mm
Diàmetre de l'eix de rotació	4 mm

Especificacions mecàniques	
Moment d'inèrcia	0,000055 $kg\ m^2$

Taula 2. Característiques del giroscopi *Super precision gyroscope* Font: [23]

Motor elèctric

Amb l'adquisició dels giroscopis també venien inclosos 2 motors elèctrics (un per a cada giroscopi) , per poder fer rotar el giroscopi, amb les següents característiques.

Amperatge sense carga	2,5 A / 14,5 w
Amperatge a 12000 rpm	0,5 A/ 3 w
Tensió	5,8 V
Tensió nominal	6 V
Bateries	4 x 'AA' (LR6)

Taula 3. Característiques del motor actuator del giroscopi Font:[23]

Capítol 5. Disseny de l'estructura i materials dels models

En aquest apartat veurem el procés i les decisions que s'han pres per dur a terme el disseny estructural d'ambdós models.

5.1 Especificacions i forma del model

Per tal de poder realitzar una avaluació final més justa i equilibrada hem imposat un seguit de normes que ambdós models han de complir.

- Estructura de la cabina el més simple possible.
- Aproximar el màxim possible el pes d'ambdós models.
- Volum més reduït possible

La forma escollida per a la cabina del model ha sigut la quadrada ja que s'estructura més simple que ens podem trobar en cabines i degut a que és simètrica és més fàcil trobar-ne el centre de gravetat. Per tant les inèrcies també resulten ser simètriques. Recordem que podem definir la inèrcia com la propietat que tenen aquests en romandre en el seu estat actual, ja sigui repòs o moviment, sempre que la força aplicada sigui 0, és a dir, la resistència que oposa aquest a modificar el seu estat actual. I per tal de simplificar-ne el disseny es important que ambdós eixos de l'estructura tinguin les mateixes inèrcies.

Així doncs degut a la forma del cub, el seu centre de gravetat serà al centre tal com veiem en la següent figura.

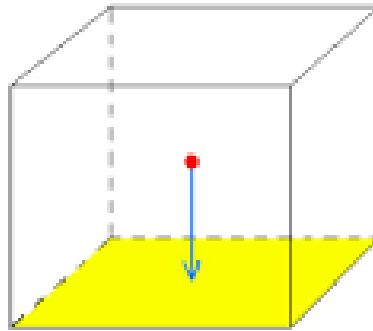


Figura 24. Centre de gravetat d'un cub Font:[33]

Sabem que les inèrcies d'un rectangle són :

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (9)$$

$$I_y = \frac{hb^3}{12} \quad (10)$$

I degut que estem treballant amb un quadrat, els costats b i h són iguals, per tant, podem definir el moment d'inèrcia a partir de l'àrea.

$$I_{x,y} = \frac{a^4}{12} \quad (11)$$

Com veiem les inèrcies d'ambdós costats són exactament iguals. Així doncs ja podem definir les dimensions de les capsas, que són de 20x20x20 cm. S'han escollit aquestes dimensions perquè són d'unes dimensions raonables que permeten la instal·lació de 2 giroscopis (que veurem en apartats posteriors) i tampoc és sobredimensionant per no augmentar molt el pes del prototips.

5.2 Materials

Per la construcció d'ambdós models s'ha optat pel contraxapat DM, ja que és un material fàcil de manipular en un entorn familiar i no requereix de la necessitat d'eines especialitzades per treballar-lo. Tant pel model digital com pel model mecànic, s'ha optat per opció d'espessor de 4 cm.

5.3 Disseny dels models

Per realitzar el disseny de les estructures d'ambdós model hem utilitzat el programa Autocad.



Figura 25. Logotip d'AutoCAD Font: [37]

El programa AutoCad, es un software de disseny assistit per ordinador , CAD, desenvolupat per l'empresa AutoDesk, utilitzant el disseny per blocs, on un bloc en autocad es el conjunt d'objectes, ens permet dibuixar línies, arcs, cercles,... entre d'altres figures geomètriques així com objectes tridimensionals.

La finalitat d'utilitzar aquest programa i no d'altres com Catia, es pel fet que hem estat treballant amb el software durant tota la carrera i ens es més còmode per treballar.

A continuació es descriu el disseny d'ambdós models tenint que les capses són iguals canviant les articulacions i subjeccions per adaptar-les als elements que s'han d'instal·lar per a cada un dels sistemes.

5.4 Disseny del model digital

En el cas digital, necessitarem que permeti la instal·lació de 2 servomotors, un per al compensació de capcineig (*pitch*) i un altre per al balanceig (*roll*), i 1 unitat IMU MPU6050 (sensor de giroscopi i acceleròmetre).

5.4.1 Ubicació del sensor

Per tal que la unitat IMU MPU 6050 sigui capaç de capturar tot els angles, la seva ubicació serà en un extrem, per amplificar de forma natural els angles adoptats. La resta de components que configuren els sistema de control es troben en la superestructura.

5.4.2 Configuració de les articulacions

La configuració ha estat inspirada en el suport d'estabilització del tipus *steadycam*, són mecanisme coneguts com '*gimbal*' que constant de 2 articulacions connectades entre sí. Una primera o interior que encapsula la càmera, en el nostre cas la cabina, i un secundaria o exterior que articula la primera amb un suport extern o en el nostre cas, la superestructura del vaixell.

En l'articulació interior, la unió articulació-cabina es troba alineada amb el centre de gravetat del cub, mitjançant un servomotor, i per tal de no sobre carregar tot el pes i moments generats és col·loca un rodament per repartir els esforços entre aquests 2 elements.

L'articulació exterior, que és troba unida a la superestructura del vaixell, s'uneix a l'articulació interior pel seu centre.

Amb aquesta configuració podem controlar el moviments de *pitch* i *roll* que adoptar l'embarcació mitjançant 2 servomotors.

En un primer moment és va plantejar de fer un model més proper a la seva implementació a un vaixell real, és a dir, els braços fixats a un superfície vertical que envolta el compartiment. En la Figura 26 observem la seva vista en planta, mentre que a la Figura 27 en veiem el perfil amb una mostra de rotació del compartiment que volem estabilitzar.

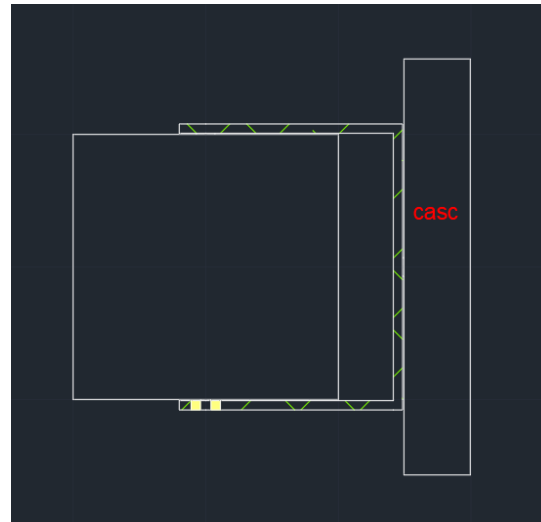


Figura 26. Concepte de la fixació interior

Per calcular els espais necessaris per permetre la rotació de la cabina amb un màxim de 90 graus respecte la superestructura del vaixell s'ha utilitzat el teorema de Pitàgores.

$$H = \sqrt{C^2 + C^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 20\sqrt{2} = 28,3 \text{ cm} \quad (12)$$

A aquesta distància l'hi he sumat un factor d'error per possible errors de construcció de 0.7 cm .

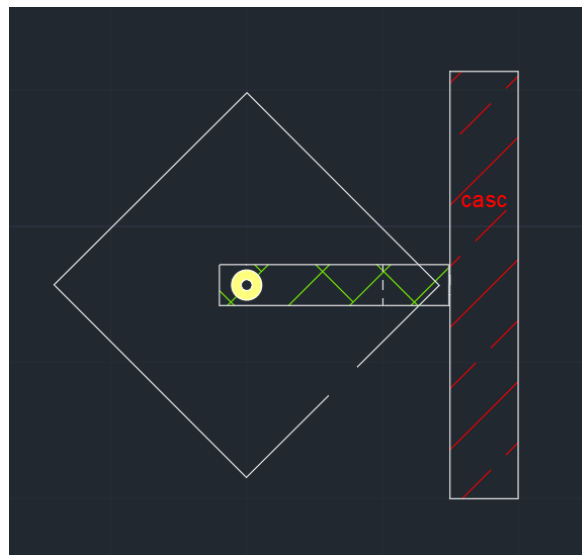


Figura 27. Concepte de la rotació en *pitch*

Aquest primer disseny és va descartar degut que el servomotor de *roll* havia de suportar tot el pes del compartiment, articulacions i servomotors de *pitch* i no estava preparat per aquests esforços.

5.4.3 Model digital

Els inconvenients que presentava aquest primer disseny es poden resoldre amb una millor repartició de càrregues tal i com es mostra a la Figura 28. Aquesta configuració ha sigut la que finalment s'ha implementat.

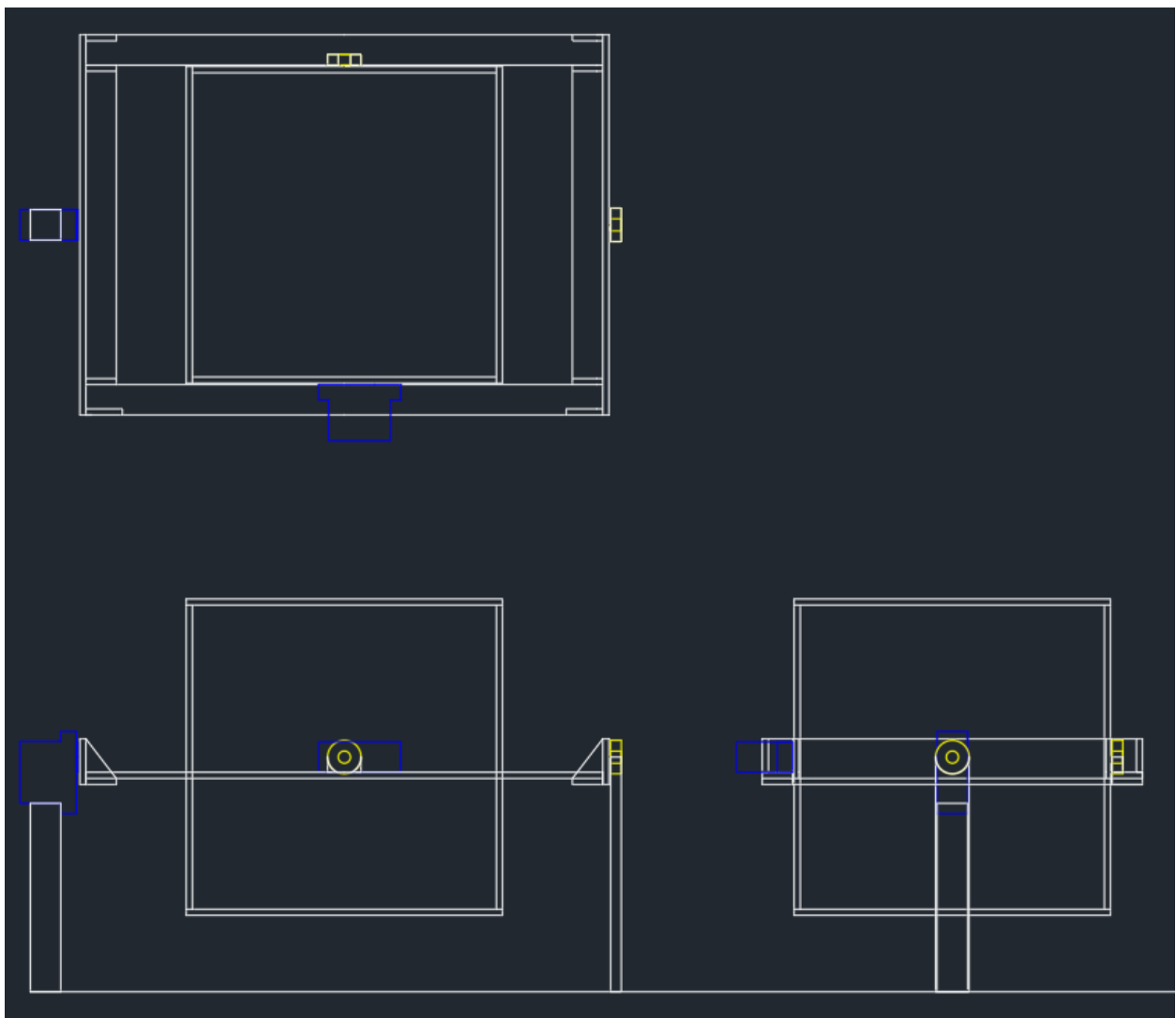


Figura 28. Model digital

Com es pot veure, per tal de simplificar en la construcció tot els pes de l'estructura recau en la base que equivaldria a la coberta del vaixell.

5.5 Disseny del model mecànic (analògic)

En aquest cas la instrumentació consistirà en la instal·lació de 2 giroscopi analògics per tant l'estructura s'ha dissenyat amb una base horitzontal igual que el digital. Aquest disseny es pot veure a la Figura 31.

Per a realitzar el disseny de l'estructura del model mecànic, d'acord amb els objectius anteriorment citats, respectarem les dimensions del model projectant-lo igual que el model digital, és a dir, 20x20x20 cm.

5.5.1 Configuració del sistema d'estabilització mecànic

És precís tenir clar quina disposició, tipus i possibles formes de control dels giroscopi tindrem per el nostre prototip mecànic. És per això que en aquest apartat veurem quin tipus i configuració de giroscopis utilitzarem per el model mecànic.

Primer de tot, recuperem la informació sobre com actua un giroscopi del tipus *gyrostat*, així com les possibles configuracions que ens podem trobar a l'hora d'utilitzar-lo com a estabilitzador. Dit això, per aquest projecte ens trobem davant la següent configuració.

5.5.2 Elecció del tipus de giroscopi

El primer pas és definir quin tipus de giroscopi utilitzarem pel projecte així com els sistemes de control agregats en cas d'haver-hi.

- **Gyrostat**, per aquest model s'utilitzaran 2 giroscopis mecànics del tipus '*gyrostat*', ja que són dels més fàcils d'adquirir i presenten totes les propietats necessàries per el seu ús com a estabilitzador en aquest projecte.
- **Eix de rotació vertical**, s'ha escollit establir l'eix de rotació vertical per facilitar el procés de disseny així com el de construcció. D'aquesta forma només es requereix ubicar 2 rodaments perpendiculars a l'eix de rotació del giroscopi per tal de permetre l'actuació del moment estabilitzador.
- **Precessió natural**, la decantació per sistema de precessió natural, ha sigut per poder realitzar l'estudi del giroscopi sense cap tipus de sistema control automàtic ja que aquest apartat correspon a l'altre model. Al mateix temps, també redueix en gran quantitat els costos de disseny i de construcció.
- **Sense control de precessió**, aquest punt és derivat de l'elecció de l'anterior.

5.5.3 Implementació dels giroscopis

En aquest punt veurem com s'implementaran els giroscopis en el nostre model. Com ja hem vist en el capítol 3, els giroscopi com a estabilitzador fas ús de la pertorbació que exerceix el mar sobre l'embarcació per així respondre amb el moment estabilitzador.

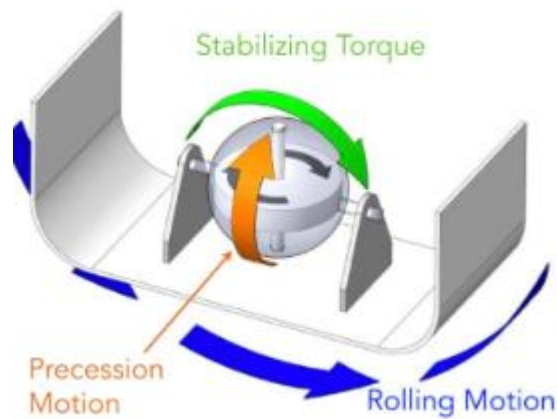


Figura 29. Moviment de *roll* del giroscopi Font:[12]

Com veiem en la figura anterior, el fet de tenir l'eix de rotació vertical, fa que l'orientació del suports perpendiculars a l'eix de rotació hagin de ser paral·lels al moment escorant.

Així doncs, la distribució d'aquests dins del model ha de ser coherent amb la figura següent on podem observar que hi ha 2 giroscopis perpendiculars entre si per tal de que cada un d'ells exerceixi un moment estabilitzant afins a la seva orientació, és a dir, el de proa està orientat per estabilitzar l'embarcació davant del moviment de *pitch*, mentre que el de la popa està orientat per contrarestar els *roll* de l'embarcació, fent així, una combinació que redueix ambdós moviments.

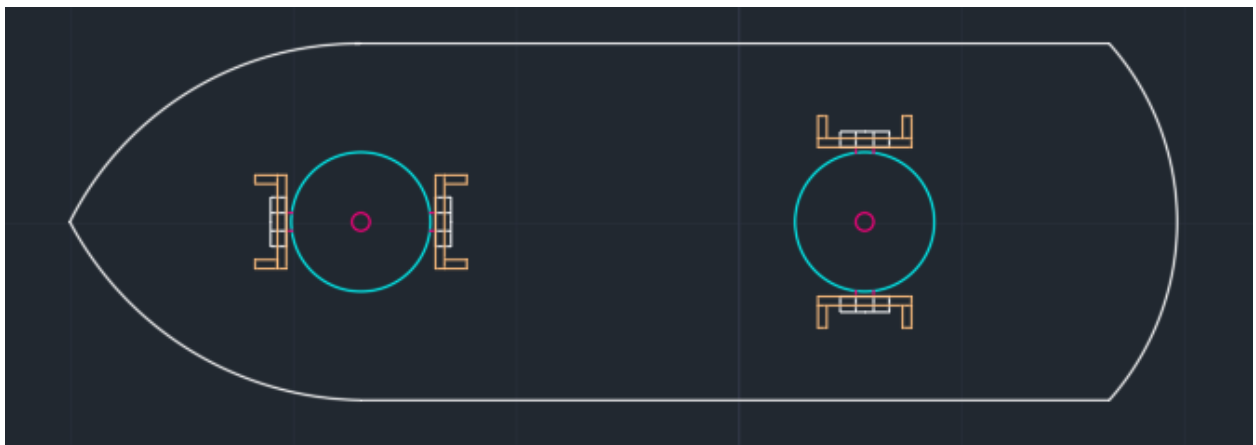


Figura 30. Configuració del giroscopi en una embarcació

Així doncs, tal com veiem en la Figura 31, hem ubicat els dos giroscopis del tipus *gyrostat* respectant la configuració establerta per poder estabilitzat el model davant dels moviments de *roll* i *pitch*.

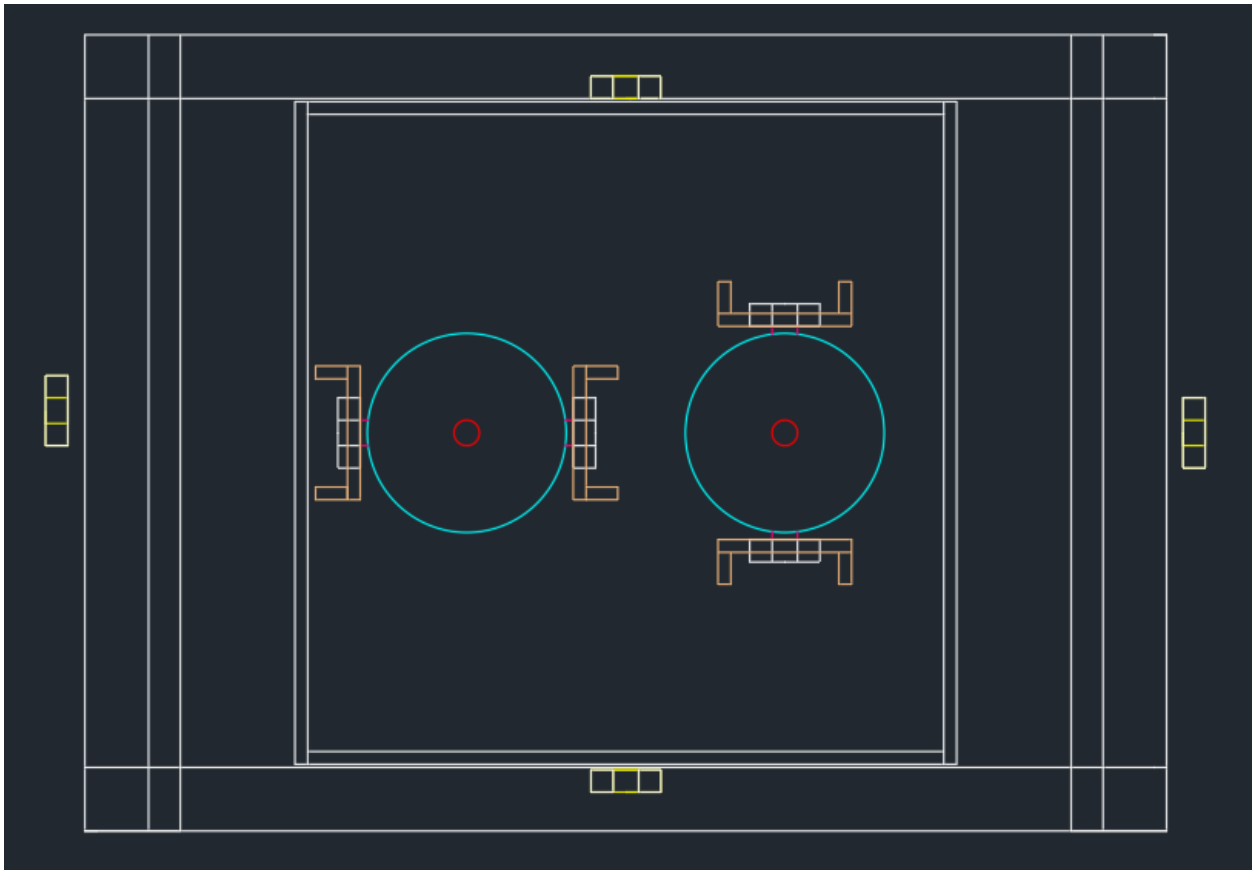


Figura 31. Disposició del giroscopis en el model

5.5.4 Suport dels giroscopis

El primer pas de disseny un cop definides les dimensions i disposició dels elements dins del model és dissenyar els suports que permetin subjectar el giroscopis a la seva ubicació al mateix temps que permet la seva rotació per poder generar el moment estabilitzador.

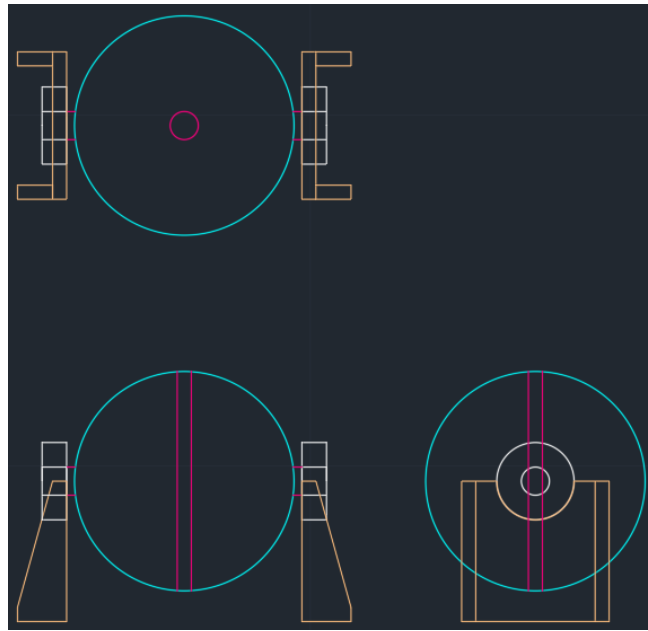


Figura 32. Suport dels giroscopis

Tal com veiem en la Figura 32, podem trobar 2 rodaments acoblats a l'eix perpendicular a l'eix de rotació de tal manera que permet el moviment oscil·lant longitudinal en el cas del giroscopi pel *roll* i transversal en cas del *pitch*.

Aquests descansen sobre una base fixe que els uneix a l'estructura de la cabina a estabilitzar. Al mateix temps aquesta base també eleva el giroscopi 0.88 cm sobre el pla de la cabina per assegurar una òptima rotació.

5.5.5 Sistema d'articulacions

Per tal d'assegurar una millor comparació en aquest cas s'ha decidit fer servir el mateix tipus de mecanisme que en model digital, no obstant el no disposar de servomotors s'han modificat algunes parts per adaptar-les millor amb el rodaments (veure la Figura 33).

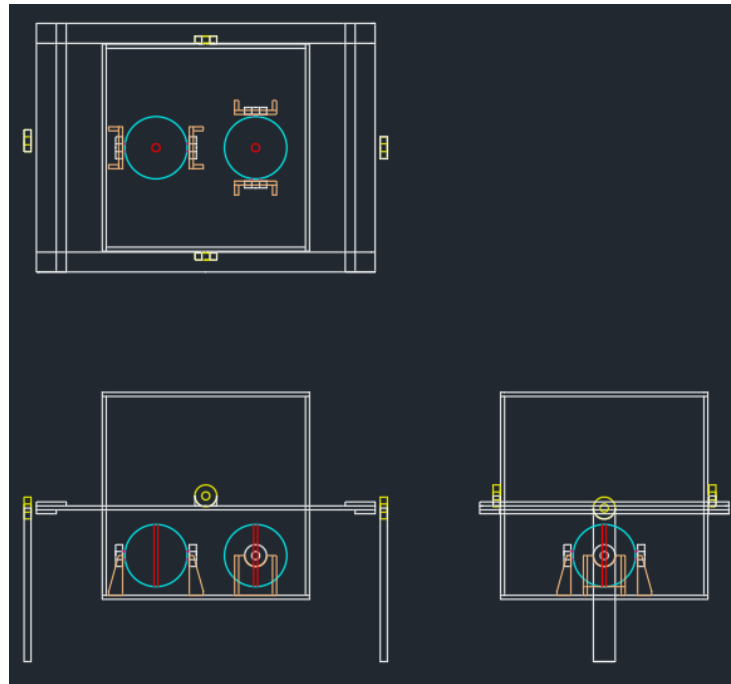


Figura 33. Model mecànic

5.5.6 Sistema elèctric del model mecànic

El sistema elèctric del model mecànic consta de 2 motors amb les següents característiques:

Amperatge sense carga	2.5 A / 14.5 w
Amperatge a 12000 rpm	0.5 A/ 3 w
Tensió	5.8 V
Tensió nominal	6 V
Bateries	4 x 'AA' (LR6)

Taula 4. Característiques del sistema elèctric Font [23]

Els dos motors elèctrics no seran fixos, per evitar agregar més pes al model, no obstant, si que es possible la seva agregació al model de forma permanent.

Capítol 6. Construcció dels models

En aquest capítol veurem el procés de construcció d'ambdós models, seguint com a guia el procés de disseny que hem realitzat en apartats anteriors.

6.1 Llistat d'eines i materials

Abans de començar a descriure el procés de construcció, farem un llistat de materials i eines utilitzats per a l'elaboració dels models.

Materials comuns	
Element	Quantitat
Contra xapat DMA 1200x600x4 mm	3
Rodaments 2,2x0,8x0,7 mm	18
Dunpont Wire	1

Taula 5. Materials comuns

Eines	
Element	Quantitat
Serra de marqueteria	1
Paper de vidre	1
Llimes per a fusta	2
Super Glue	6

Taula 6. Eines

Model Digital	
Element	Quantitat
Servo motors MG996r	2
IMU MPU6050	1
Arduino MEGA 2560	1

Taula 7. Components del model digital

Model Analògic	
Element	Quantitat
Super precision Gyroscope	2

Taula 8. Components de model analògic

6.2 Construcció del model digital

El primer pas és sobre un del taulers de contraxapat DMA dibuixar les cada una de les parts que conformaran el nostre model, que són:

Part	Dimensions	Quantitat
Base	20,8 x 20,8 x 0,4 cm	1
Laterals	20,4 x 20 x 0,4 cm	4
Articulació transversal	34 x 2 x 0,4 cm	2
Articulació longitudinal inferior	25 x 2 x 0,4 cm	2
Articulació longitudinal superior	25 x 3 x 0,4 cm	1
Fixació al servo	5 x 4 x 0,4 cm	1

Taula 9. Elements construïts del model digital

A continuació, tallarem els suports a on descansaran els rodament que ajudaran a alleugerir carga al servo i alhora permetre una millor rotació. Així que tallarem una peça rectangular de 4 x 2 x 0,4 cm, i en marcarem el centre en un dels costats de 4 cm i en tallarem una semicircumferència de radi 1'1 cm.

Seguirem amb la construcció dels suports a on descansaran el servo de l'articulació exterior i el rodament. Per fer-ho tallarem 4 peces de $15 \times 2 \times 0,4$ cm, que conformaran els suport pel servo i 1 peça de $17 \times 2,5 \times 0,4$ cm, i en un dels extrems repetirem el procés anterior per poder-hi recolzar el rodament.

Seguidament tallarem els llistons de fusta que serviran com a eix de rotació intern per el rodaments, per fer-ho tallarem per a cada rodament 2 llistons de $1 \times 0,5 \times 0,4$ cm.

Continuem enganxant les peces tal com es mostra en el plànol, però sense enganxar les parts mòbils.

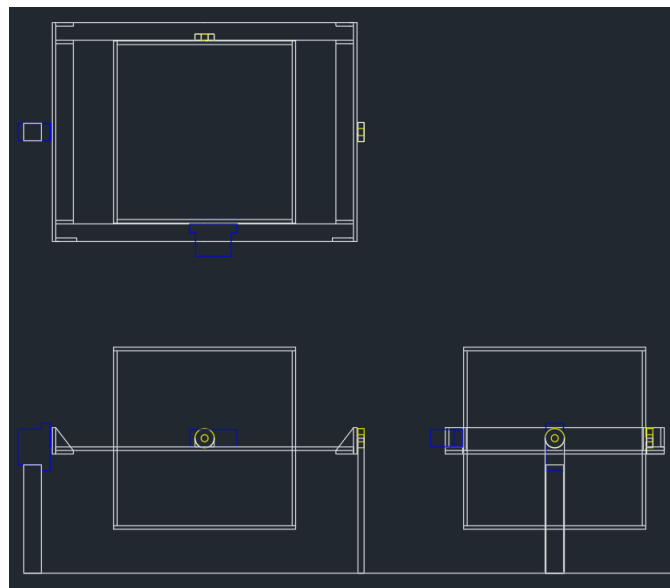


Figura 34. Disseny del model digital

Un cop tinguem els 3 components general del model enganxats, farem corre un programa de Simulink molt bàsic per tal d'assegurar que els servo motors estaran en la posició inicial indicada.

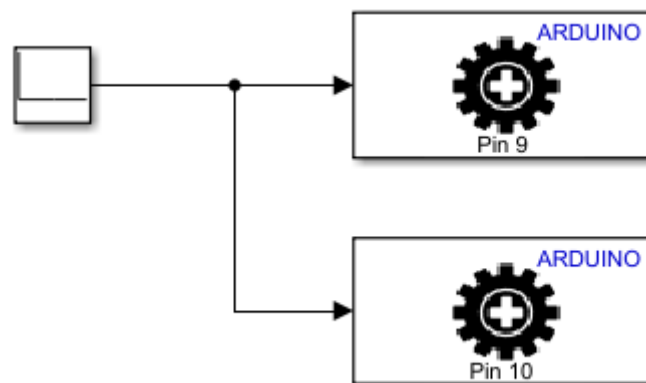


Figura 35. Enclavament a 90 graus dels servo motors

Aquests blocs de Simulink el que fan es ubicar el servo motor a 90 graus, ja que degut a que el nostre rang operacional és de -90 graus a 90 graus, és necessari que el seu estat inicial sigui a 90 graus que equivalen a 0 graus d'escora.

Així doncs un cop ens hem assegurat que els servo motors estan en l'angle indicat, ja podem acoblar les parts mòbils, i el darrer pas serà ubicar la unitat IMU MPU6050 a l'interior del model i verificar que funciona correctament.

Per fer-ho ubiquem la unitat IMU MPU6050 en un extrem de l'interior de la capsula, i amb el Simulink en pertorbem l'angle per verificar que capta correctament els angles i que efectivament, en repòs hi ha un angle de 0 graus.

6.3 Construcció del model analògic

Seguin els procediments que hem realitzat amb el model digital, començarem tallant les peces sobre un dels taulers de contraxapat DMA .

Part	Dimensions	Quantitat
Base	20,8 x 20,8 x 0,4 cm	1
Laterals	20,4 x 20 x 0,4 cm	4
Articulació transversal	34 x 2 x 0,4 cm	2
Articulació longitudinal inferior	25 x 2 x 0,4 cm	2
Articulació longitudinal superior	25 x 3 x 0,4 cm	2
Suport del giroscopis	1,8 x 2 x 0,4 cm	4

Taula 10. Elements construïts del model analògic

Per els suports del giroscopis caldrà repetir el procediment de tallar una semicircumferència amb radi de 1'1 cm per tal de poder-hi recolzar els rodaments dels giroscopis.

A continuació, tallarem les fixacions, en forma de passadors, que evitaran que els giroscopis es moguin degut als moments generats durant el moviment escorant. Necessitem tallar el següent:

Part	Dimensions	Quantitat
Suport dels passadors	20,8 x 20,8 x 0,4 cm	4
Passadors	20,4 x 20 x 0,4 cm	4

Taula 11. Passadors de subjecció dels giroscopis

Un cop ja tenim totes les peces tallades, ja podem procedir a enganxar-les totes exceptuant dels passadors, ja que els passarem un cop els giroscopis estiguin instal·lats. Per a eix de rotació intern del rodaments, repetirem els procés realitzat per el model digital.

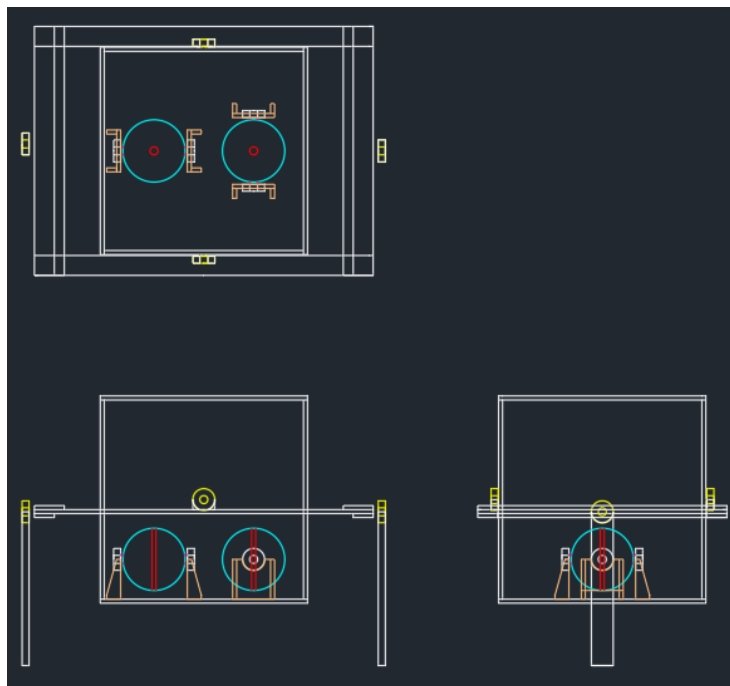


Figura 36. Disseny del model mecànic

A continuació mostrarem un seguit d'imatges dels models construïts en aquest projecte.

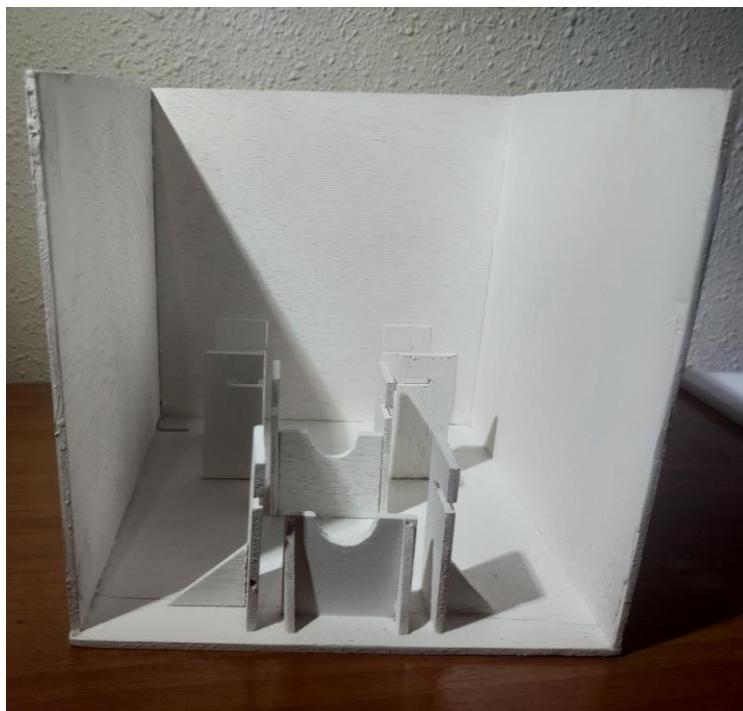


Figura 37. Capsa del model analògic



Figura 38. Capsa del model digital



Figura 39. Instrumentació del model analògic

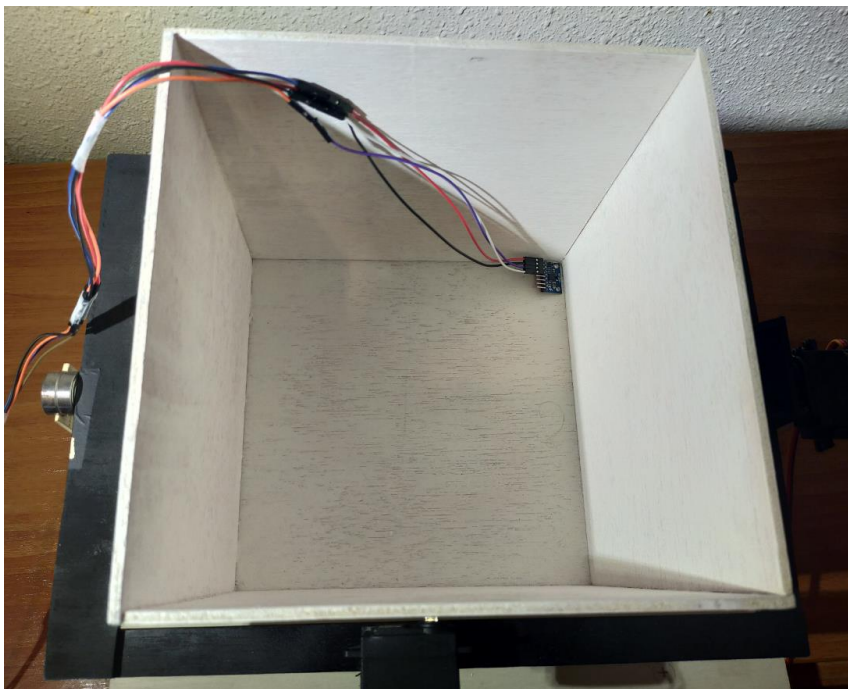


Figura 40. Instrumentació del model digital

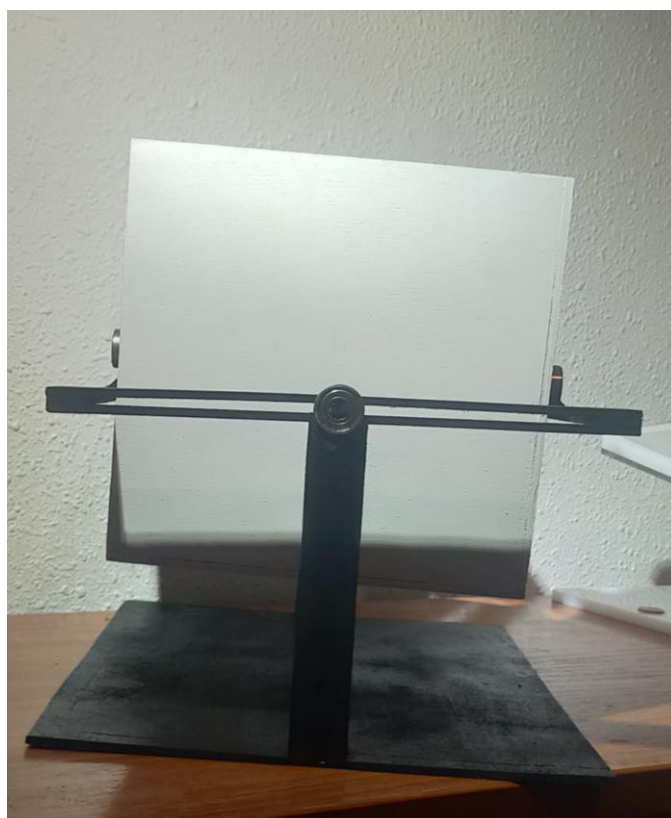


Figura 41. Model analògic en estàtic



Figura 42. Model analògic amb escora

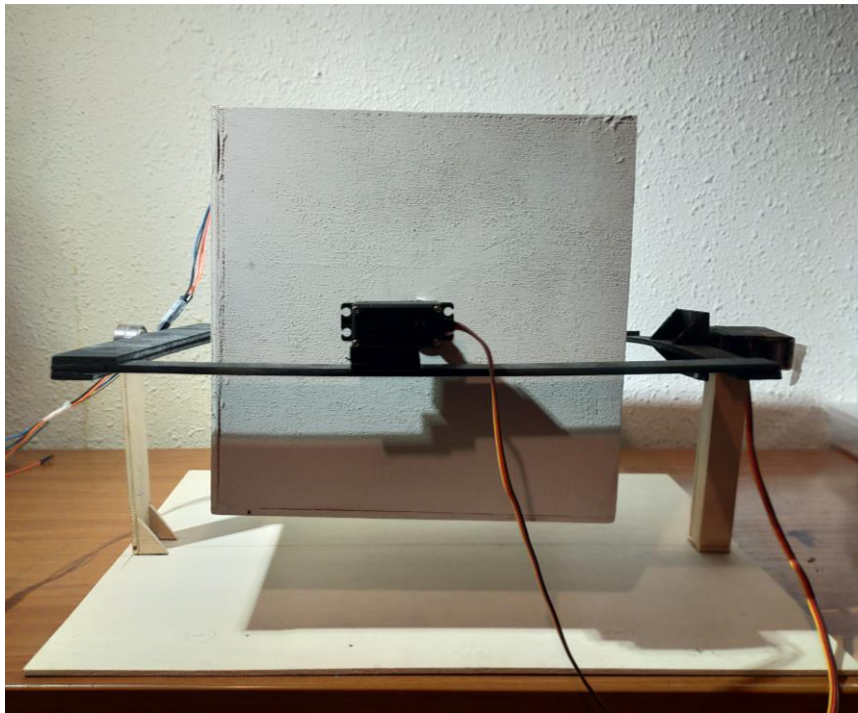


Figura 43. Model digital en estàtic

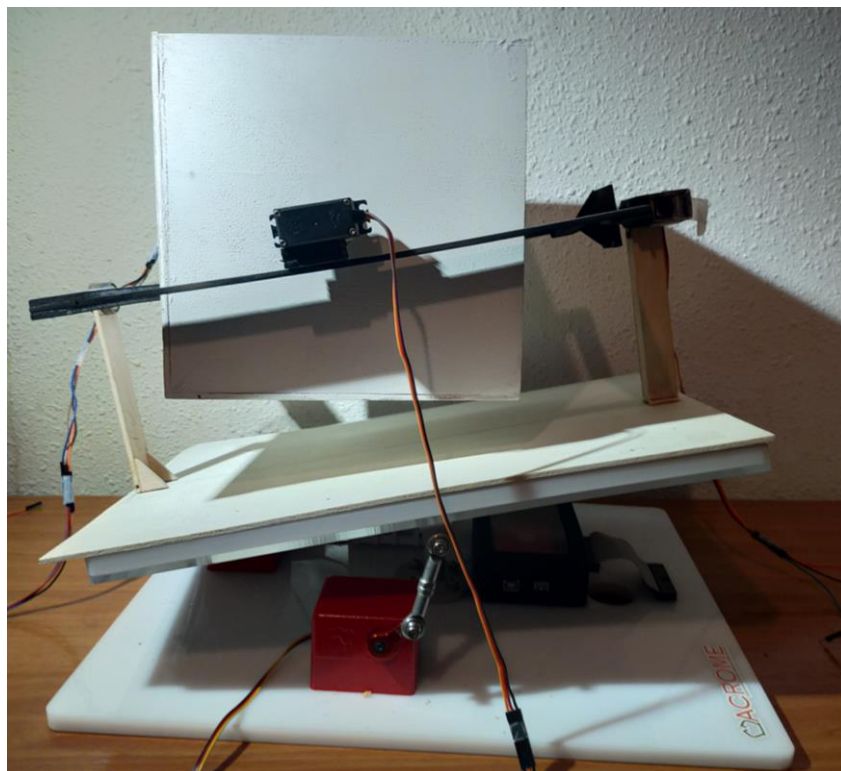


Figura 44. Model digital amb escora

Capítol 7. Sistema de control d'estabilització digital

En el capítol anterior, de construcció de models, ja hem presentat el muntatge complet del model analògic. En el cas del model digital cal fer algunes accions addicionals que són les que es presentaran aquí. En particular veurem el calibrat del sensor, el disseny i sintonització del controlador i la seva implementació mitjançant un Arduino connectat al programa Simulink.

7.1 Calibrat del sensor

Abans de començar a dissenyar el sistema de control, hem d'aconseguir una bona presa de dades per tal de poder assegurar que estem treballant amb un model que adquireix bé els moviments que adopta.

Connexions

El primer abans de començar el calibrat és conèixer les connexions necessàries per tal de poder utilitzar la unitat IMU MPU6050 correctament.

Com podem veure a la figura següent, per al correcte funcionament del sensor, tan sols calen 4 connexions:

- Una connexió d'alimentació a 5V, cable vermell
- Una connexió de terra, cable negre
- Una connexió SDA, *Serial Data*, per on viatge la informació, cable blau.
- Una connexió SCL, *Serial Clock*, per es controla el temps entre sensor i placa, cable groc.
- Una connexió pel port USB amb un ordinador amb el MatLab i Simulink instal·lat.

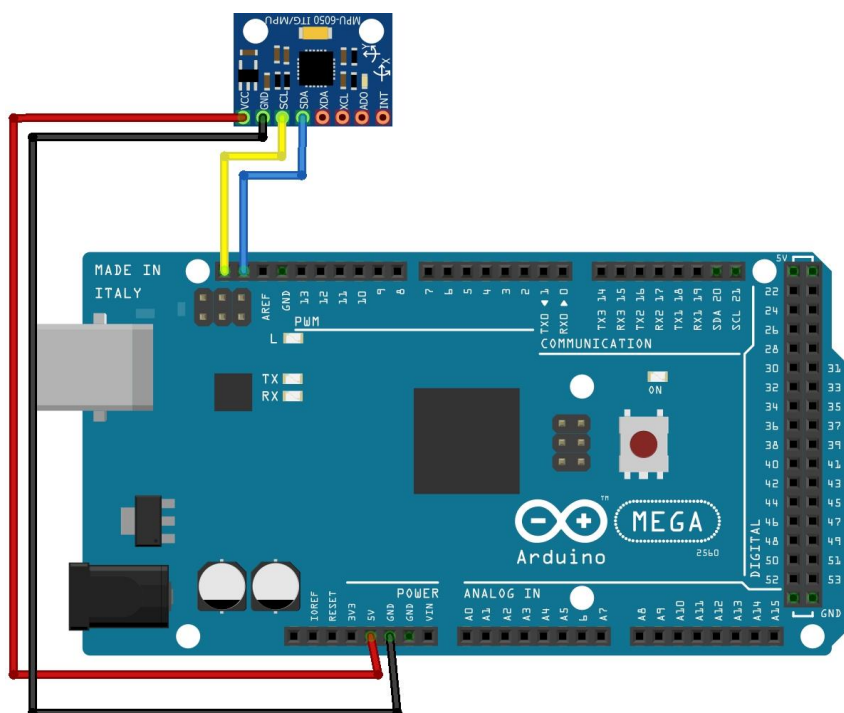


Figura 45. Connexions de la IMU MPU 6050 Font: Pròpia

El següent pas és verificar la correcta lectura dels angles, és per això que com a sensor del nostre sistema farem servir la unitat IMU MPU6050, que consta de 2 components que ens ajudaran a la presa de dades: un giroscopi del tipus MEMS i un acceleròmetre. Per tal de poder realitzar la lectura conjunta d'ambdós components farem servir les dades preses pel giroscopi i per l'acceleròmetre de forma conjunta amb l'ajut del programa MatLab i Simulink.



Figura 46. Logotip de la MatLab i Simulink Font:[25]

El programa de MatLab, Matrix Laboratory, és un software de computació numèrica desenvolupat per l'empresa MathWorks fundada per Cleve Moler, que disposa d'un entorn de desenvolupament molt útil per la presa i computació de dades a més de disposar d'un entorn de programació visual, el Simulink.

El fet d'utilitzar aquests programes i no els IDE, (*Integrated Development Environmet*) propis de les plaques arduino, és perquè permet una millor presa de dades, programació per blocs i crear gràfiques que són molt útils per monitoritzar el comportament del sistema en temps real.

Així doncs, per poder treballar amb el sensor MPU6050, cal descarregar una 'llibreria' per Simulink que es diu *Rensselaer Arduino Support Package* [42] que ens permet controlar i prendre dades del sensor per mitjà del Matlab.

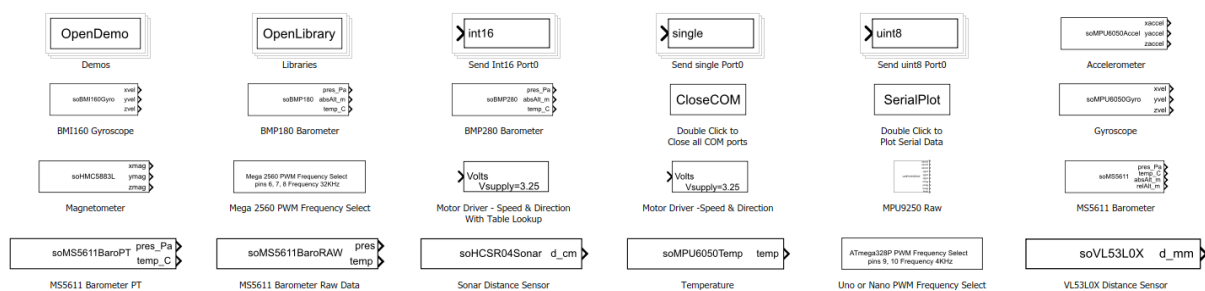


Figura 47. Llibreria complet del *Renssealer Arduino Suport Package*

En la figura anterior podem observar els blocs que ens proporciona la llibreria *Rensselaer Arduino Suport Package*, no obstant només farem servir els blocs del sensor MPU6050.



Figura 48. Blocs del MPU6050 de la llibreria *Renssealer Arduino Suport Package*

Per tal de poder treballar amb aquesta llibreria farem servir un temps de mostreig de 0.1s ja que per la nostra aplicació és més que suficient.

MPU 6050 - Giroscopi

Com hem dit anteriorment, la unitat IMU MPU 6050 disposa d'un acceleròmetre i un giroscopi, per tal de mesura l'angle de *roll* i l'angle de *pitch*, combinarem les mesures que ens proporciona l'acceleròmetre i

el giroscopi de l'esmentada unitat. Això es farà perquè la lectura del acceleròmetre per si sola és massa sorollosa mentre que la del giroscopi conté massa *offset*.

Primer començarem prenent les dades que ens proporciona el giroscopi digital del tipus MEMS, prèviament però, ja haurem d'haver esbrinat la orientació de cada un dels 3 eixos del giroscopi per tal de poder dissenyar bé el programa, en el nostre cas la coberta del sensor ja ens mostra quins són els eixos x i y .

Degut als moviments que podem controlar amb els servomotors, només ens caldrà prendre les dades dels eixos x i y o *roll* i *pitch*, ja el moviment vertical no el podem compensar amb els mecanismes dels que disposem.

Un cop sabem això, ja podem llegir les primeres dades que ens treu directament el sensor, que són les velocitats angulars dels eixos de *pitch* i *roll*. La Figura 49 mostra la velocitat angular del *roll* que s'extreu directament del port "xvel" del bloc Simulink "soMPU6050Gyro" de la figura anterior, al moure el sensor.

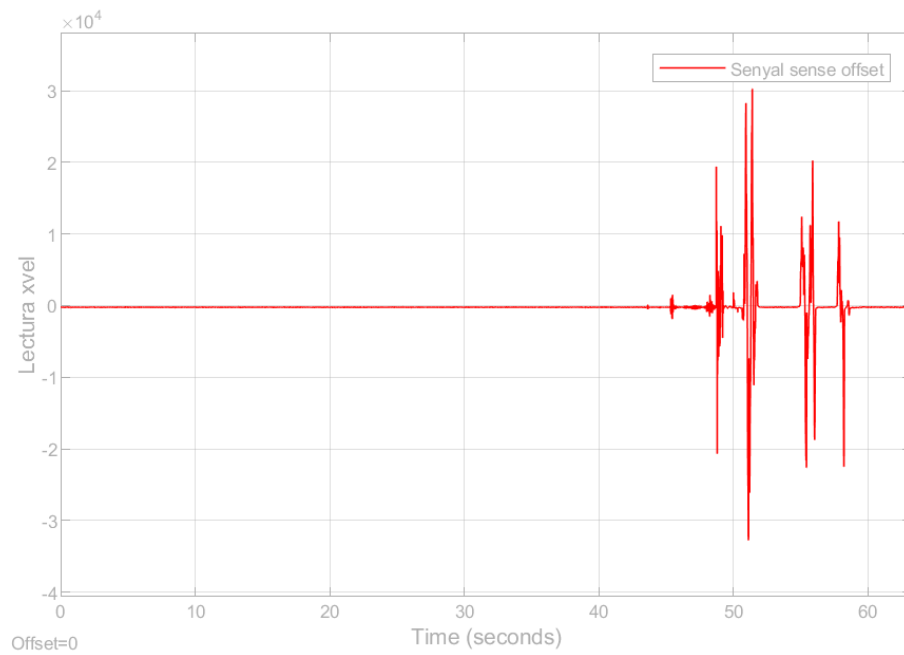


Figura 49. Dades extreptes directament del giroscopi

A la Figura 50 observem una ampliació de la figura anterior a fi de veure quin el nivell de soroll d'aquest dispositiu i quin és l'*offset* que presenta. És a dir, quin valor ens està donant quan sabem que la velocitat real és zero.

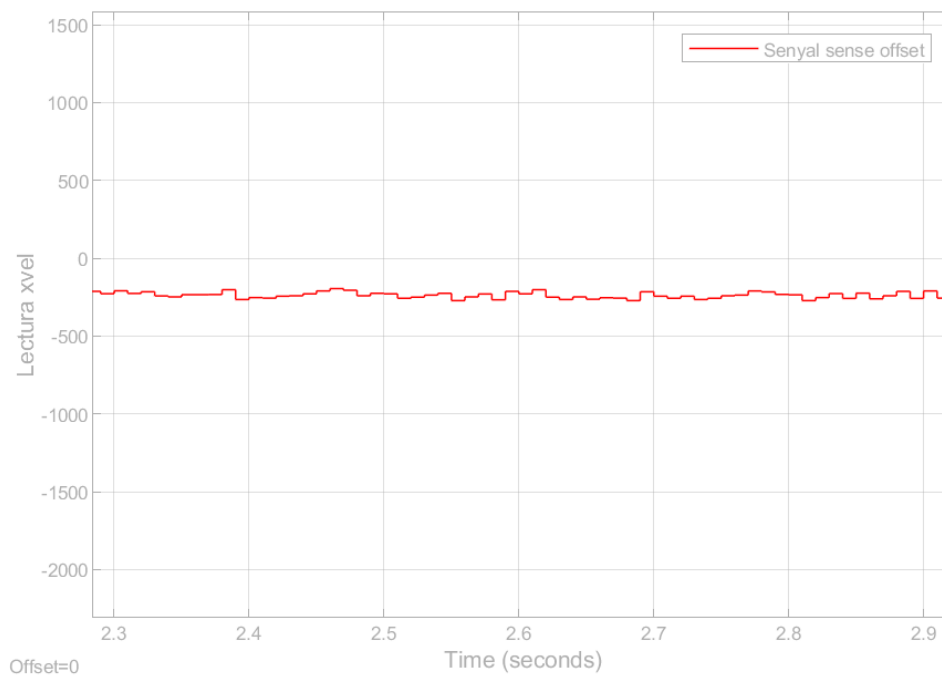


Figura 50. Nivell d'*offset* de la senyal directa del giroscopi

Com veiem tenim un cert valor d'*offset*, és a dir, diferencia entre la mesura i el valor real, en aquest cas el valor de real és 0 i la lectura del sensor és aproximadament 230. En aquest cas per tal de solucionar-ho, l'hi sumarem una constant del valor específic per tal de contrarestar aquest error i tornem a mostrar una gràfica per comprovar que hem minimitzat l'error, per arribar a tenir un valor acceptable hem fet varies iteracions per ajustar-lo el màxim possible.

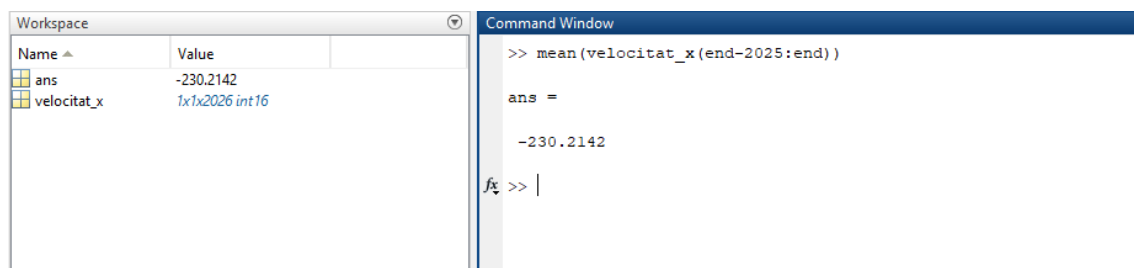


Figura 51. Càlcul de l'*offset*

En la figura anterior, observem el càlcul realitzar per a trobar l'*offset* derivat de l'arrossegament del l'error, un cop el tenim només ens caldrà sumar aquest valor a la senyal per tal de solucionar-ne els efectes.

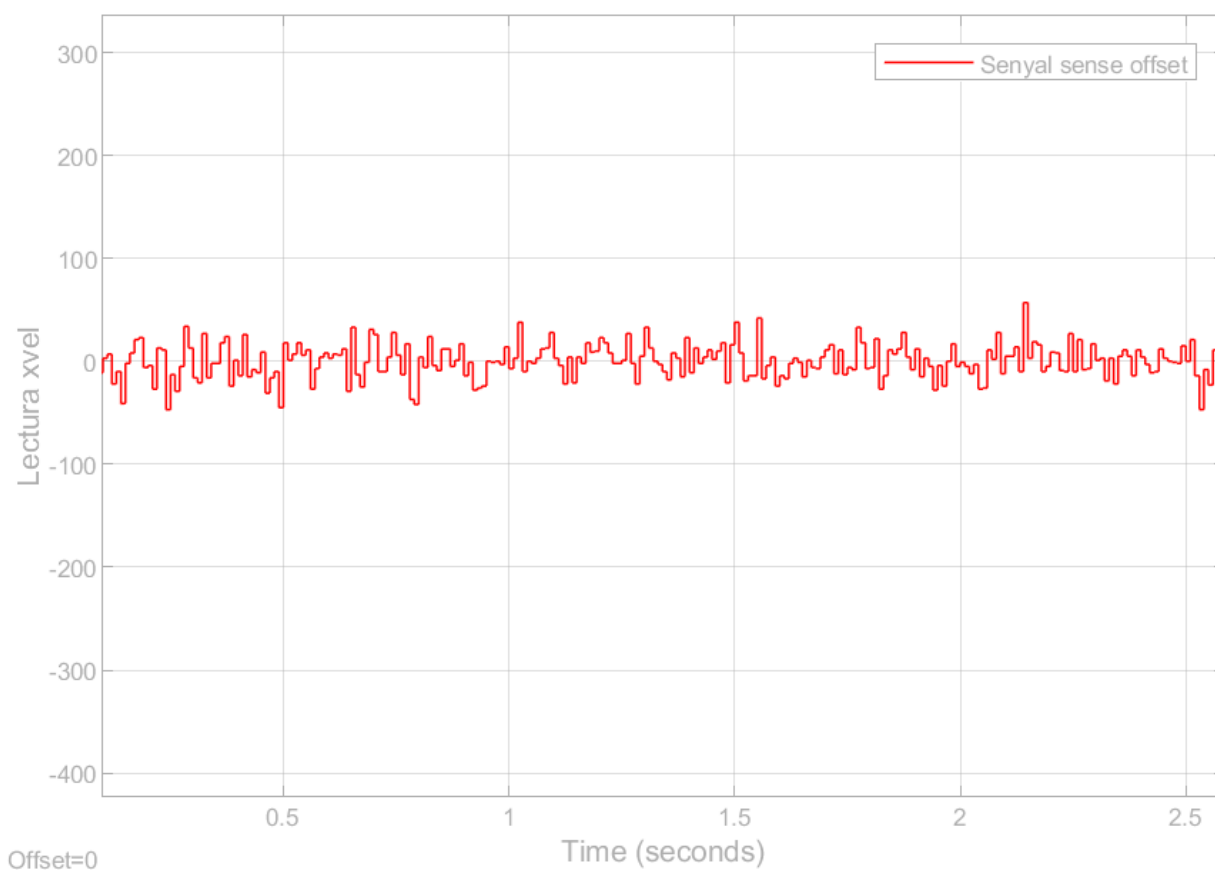


Figura 52. Senyal amb el giroscopi calibrat

Per al cas de *pitch* s'ha seguit el mateix procediment obtenint un valor de correcció de 335'2565.

A continuació, com que el que estem mesurant és la velocitat angular, hem d'integrar el valor actual per tal de poder aconseguir una posició angular i comprovar els valor d'*offset* que hem trobat anteriorment. Fem servir el bloc *double* per tal de convertir els valors d'enters a reals, tal com observem a la figura següent.

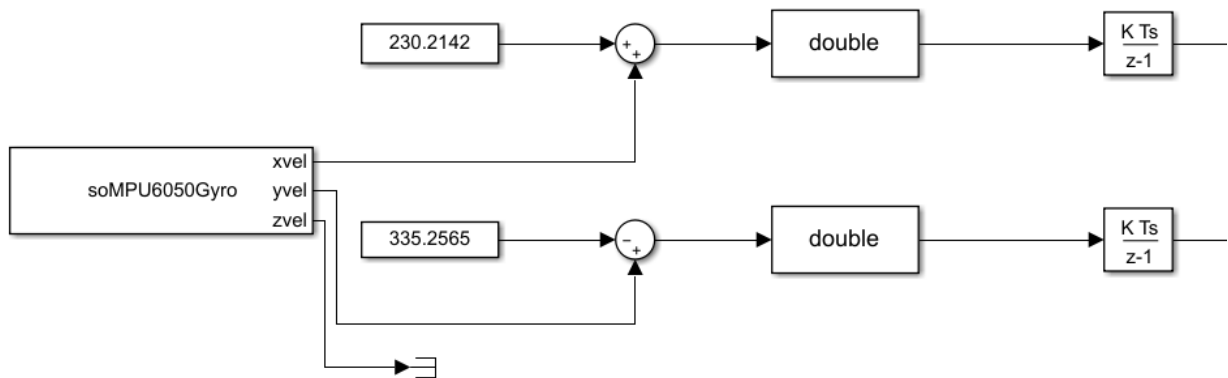
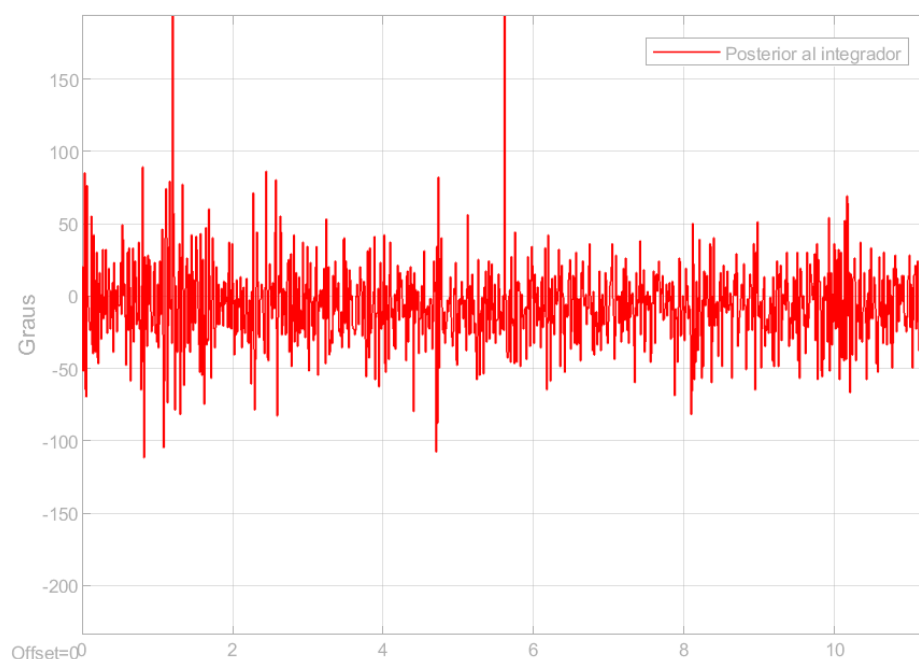


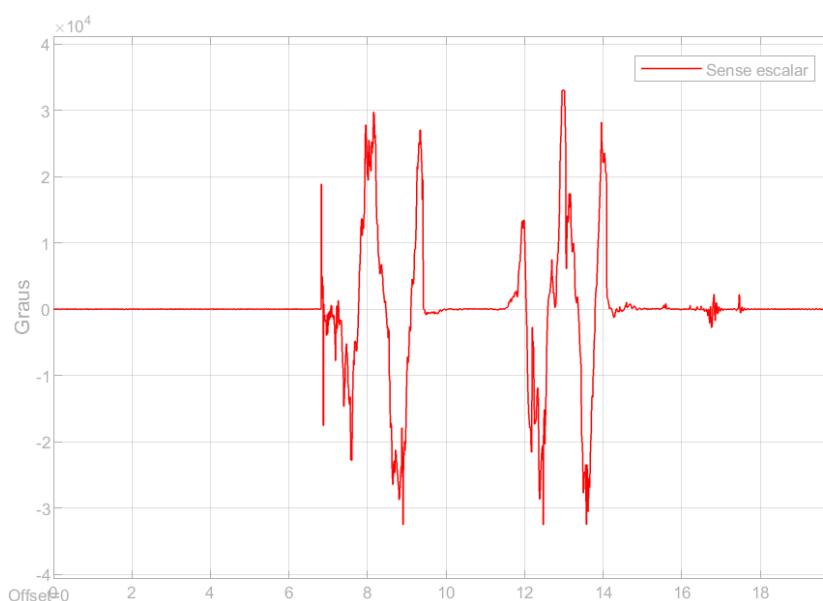
Figura 53 Blocs de calibrat de la senyal del giroscopi

A la figura anterior observem la correcció i obtenció dels angles de *pitch* i *roll*, tanmateix podem veure que hi ha un terminador a l'eix z, ja que no el fem servir per aquest projecte.


 Figura 54. Senyal posterior al integrador, posició angular (*roll*)

La figura anterior mostra doncs la posició angular (*roll*) en el cas en que el sensor està en repòs i equilibrat. Veiem que la correcció d'*offset* és correcta perquè la mesura, tot i que molt sorollosa, està centrada al voltant dels zero graus.

Quan movem el sensor obtenim una gràfica com la de la Figura 48, on la lectura del sensor pren valors molt grans, de l'ordre de 10000. Com que nosaltres volem treballar en valors de -90 a 90 graus, caldrà realitzar un escalat.


 Figura 55. Primer ajustament de la senyal, escala de l'ordre 10^4

A la figura anterior, observem que l'angle de *roll* mesurat per el giroscopi ens dona valors d'un ordre de magnitud de 10^4 , en particular quan l'angle real són 90 graus la lectura del giroscopi és de 6000 graus. Per tant realitzarem el factor d'escala que prendrem serà $90/6000$.

Com que veiem que tenim un valor que no és del tot exacte, tornem ajustar l'offset tal i com hem fet abans, i finalment, amb el nou valor de correcció d'offset (207.8134) i l'escalat de la senyal (també ha calgut iterar una mica més), obtenim la gràfica de la Figura 49 que mostra la lectura del sensor pel cas de sensor en repòs i equilibrat, i la gràfica de la Figura 50 que mostra la lectura del sensor en moviment.

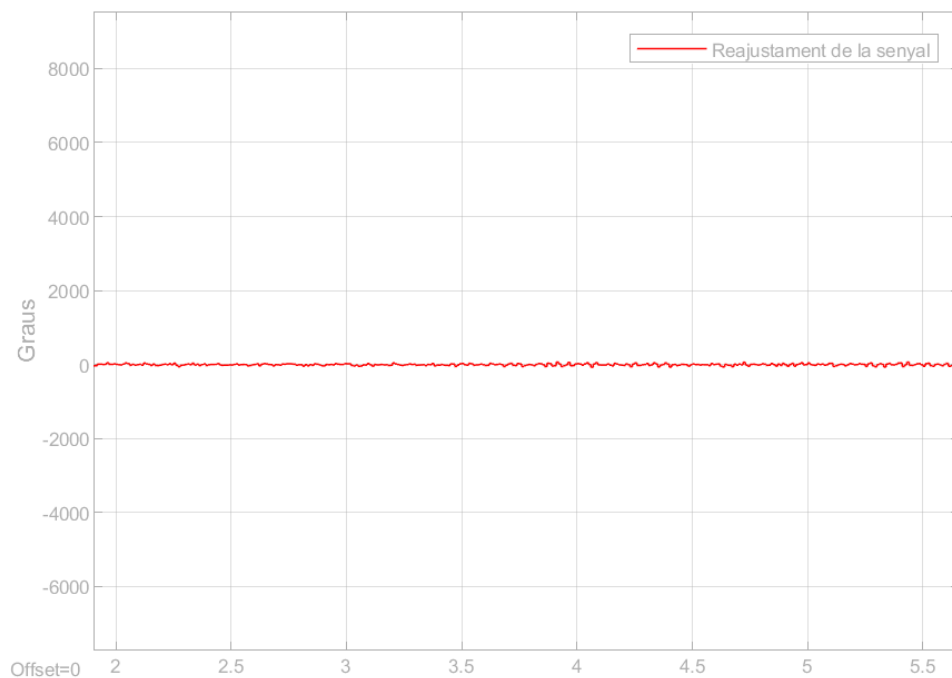


Figura 56. Darrer ajustament de la senyal

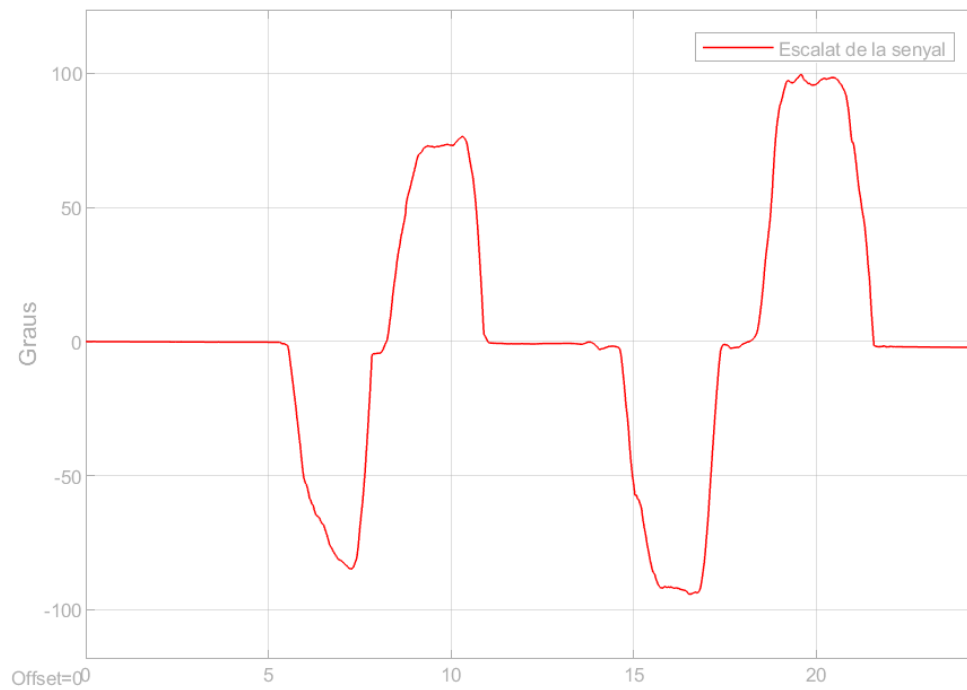


Figura 57. Comprovació de l'escalat

MPU6050 – Acceleròmetre

Un cop tenim calibrat el giroscopi, ens toca calibrar l'acceleròmetre, observem, al igual que en el cas del giroscopi que tenim un offset que hem de solucionar.

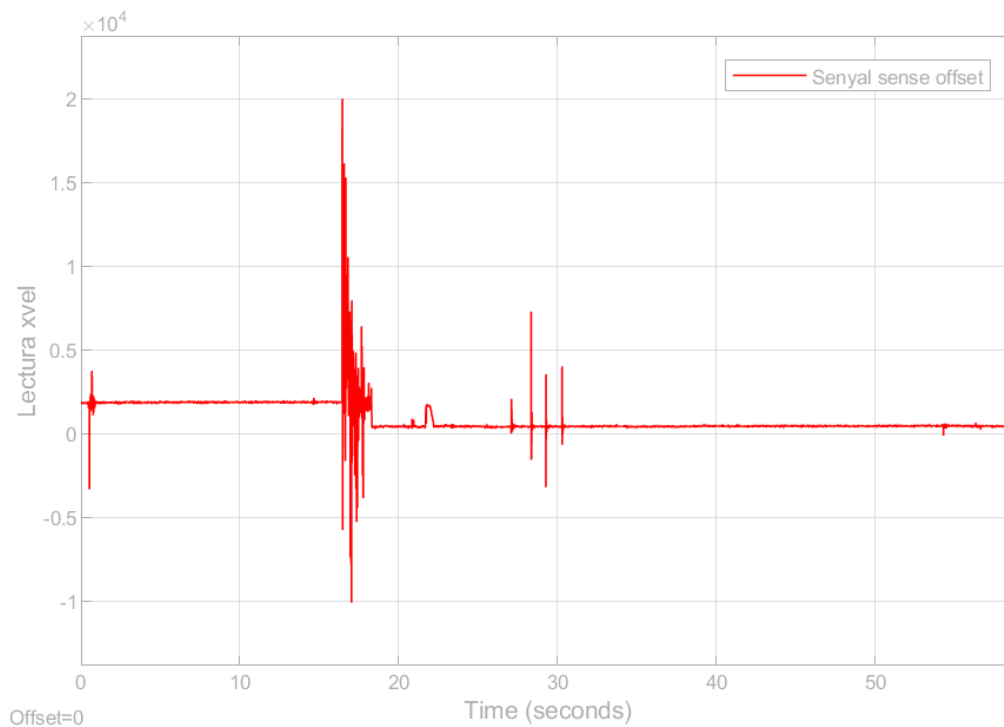


Figura 58. Dades extretes directament del bloc de l'acceleròmetre

```

0.0572
>> 0.0302-0.0270
ans =
0.0032
>> mean(acc_x(end-300:end))
ans =
1.4077
fx >>

```

Figura 59. Càlcul per ajustar la senyal del acceleròmetre

En la figura anterior, observem el càlcul realitzar per a trobar l'offset derivat de l'arrosegament del l'error, un cop el tenim només ens caldrà restar aquest valor a la senyal per tal de solucionar-ne els efectes.

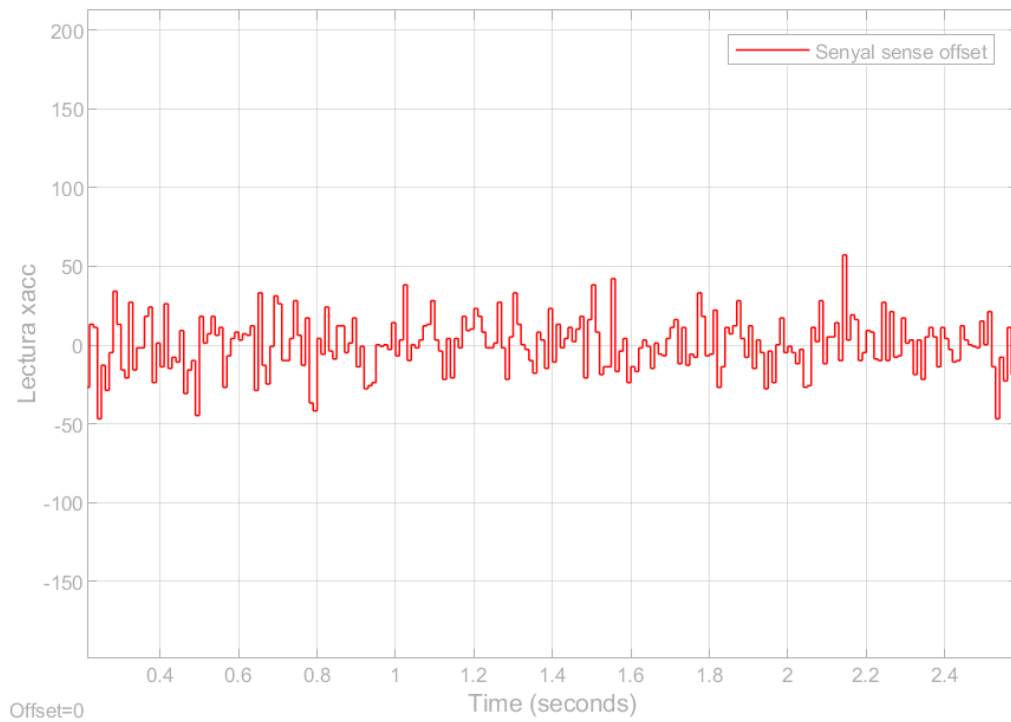


Figura 60. Acceleròmetre calibrat

Per prendre les dades del acceleròmetre, sí que farem servir les 3 acceleracions angulars que treu el sensor ja que segons les regles trigonomètriques l'angle entre dos segments és l'arc tangent del catet oposat entre el catet contigu.

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Catet oposat}}{\text{Catet contigu}} \right) \quad (13)$$

De forma que si tenim les següents relacions d'acceleracions.

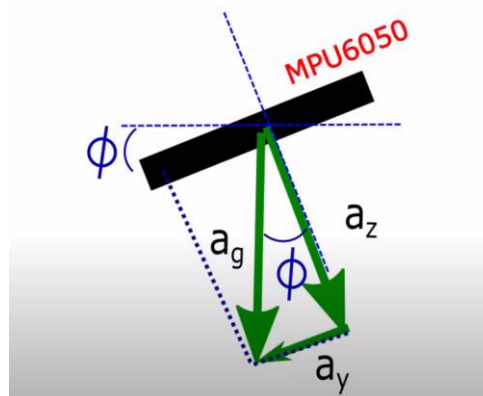


Figura 61. Relació trigonomètrica Font: [32]

D'acord amb la gràfica anterior, podem veure en la següent imatge com obtenim l'acceleració de *pitch* (eix x) fent l'arc tangent de les acceleracions dels eixos y i z respectivament.

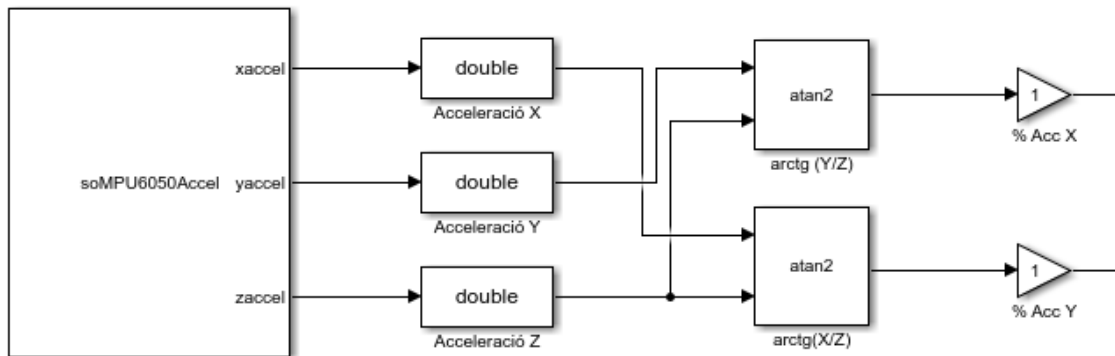


Figura 62. Presa de dades del acceleròmetre

I les acceleracions de *roll* fent l'arc tangent de les acceleracions dels eixos x i z respectivament, observem també que fem servir el bloc atan2 per tal d'evitar errors. El Matlab disposa de la funció atan per a calcular la tangent, el problema és que només dóna angles entre 0 i 90 (un quadrant). Per aquest motiu hem fet servir la funció atan2 que ja dóna els angles en dos quadrants.

En aquest cas, la mesura del acceleròmetre també presenta alguns problemes que no desitgem, un d'ells és l'aparició de soroll permanent durant tota la mostra degut a que estem mesurant la posició angular a partir d'acceleracions, i aquest mateix motiu també fa el sistema molt sensible a pertorbacions ja que a cada vibració el sensor ho enregistra com a acceleració.

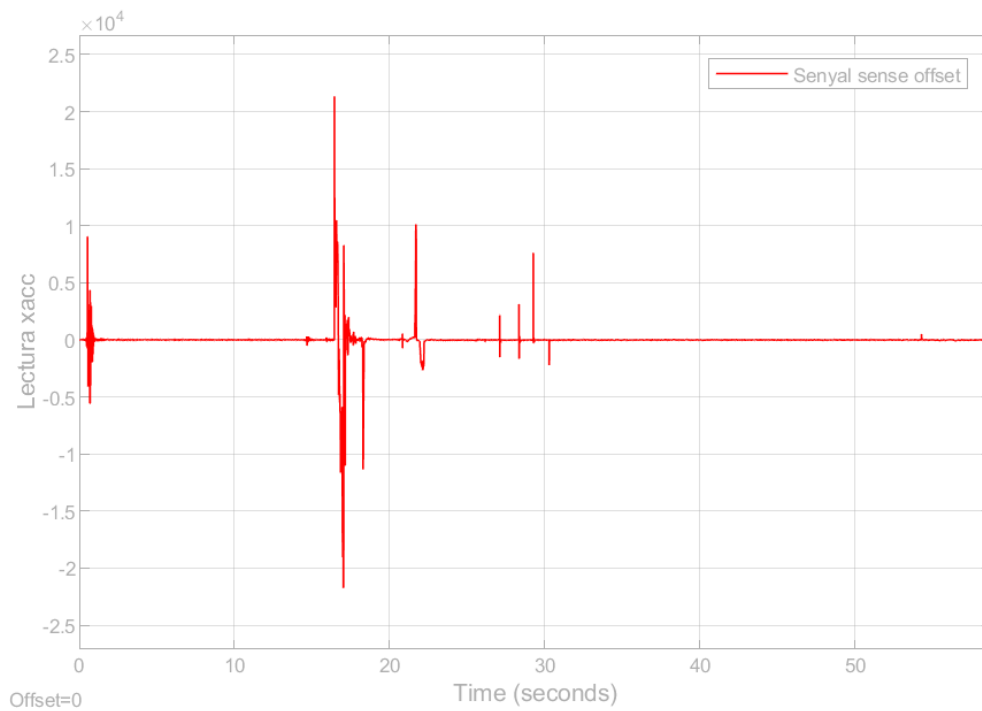


Figura 63. Soroll de les dades del acceleròmetre

En el cas de l'acceleròmetre també caldrà passar el senyal de l'acceleròmetre per un escalat ja que per un posterior processat del senyal conjunt amb la del giroscopi necessitem que estiguin a la mateixa escala. Procedim de manera similar a com ho hem fet amb el giroscopi i el resultat final es mostra a la següent figura:

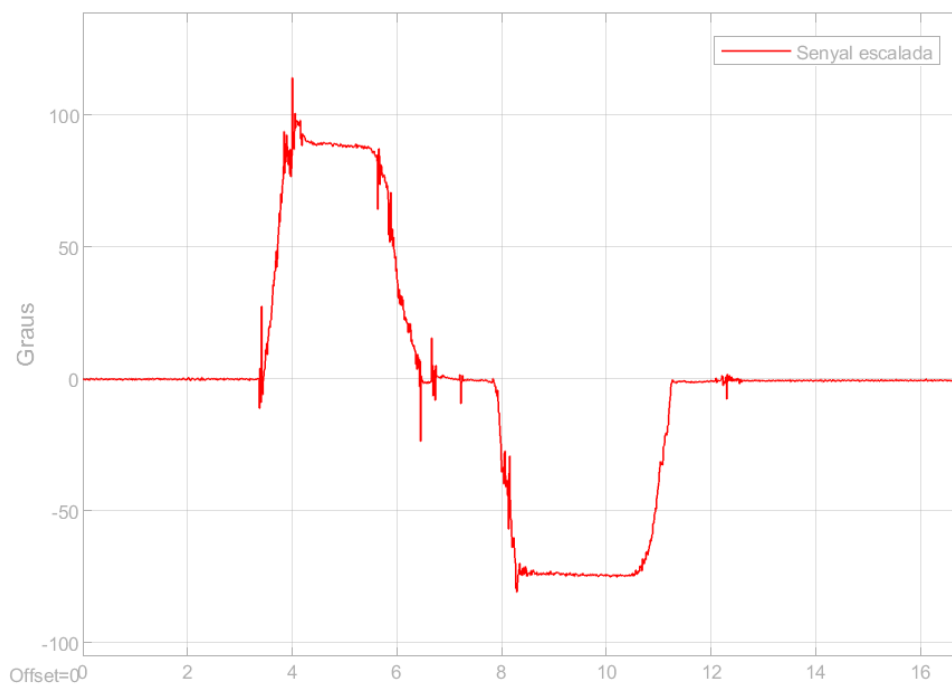


Figura 64. Escalat de la senyal de l'acceleròmetre

Combinació dels senyals. Filtre complementari

Un cop ja hem obtingut les dades dels dos components del sensor, cal ajuntar-les per tal que ens permetin obtenir un resultat el més exacte possible i per aconseguir-ho, farem passar les dos vies per un filtre complementari.

Entenem per filtre complementari, un conjunt de blocs del Simulink tals que permeten la complementació del les dues senyals per tal d'obtenir-ne una de sola.

El que farem serà combinar els 2 senyals que hem obtingut de forma percentual, per aconseguir-ho afegirem 1 guany a cada sortida, és a dir, una després de la sortida obtinguda per l'acceleròmetre i un altre per la del giroscopi, tal com podem observar a la Figura 67.

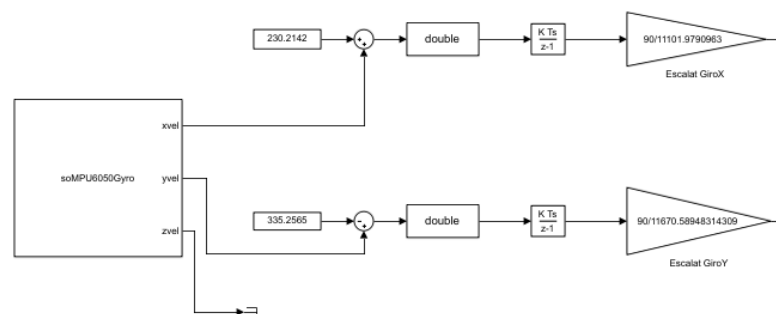


Figura 65. Configuració de la branca del giroscopi

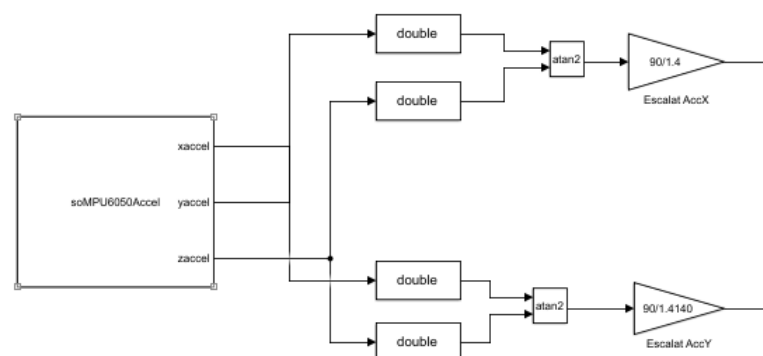


Figura 66. Configuració de la branca de l'acceleròmetre

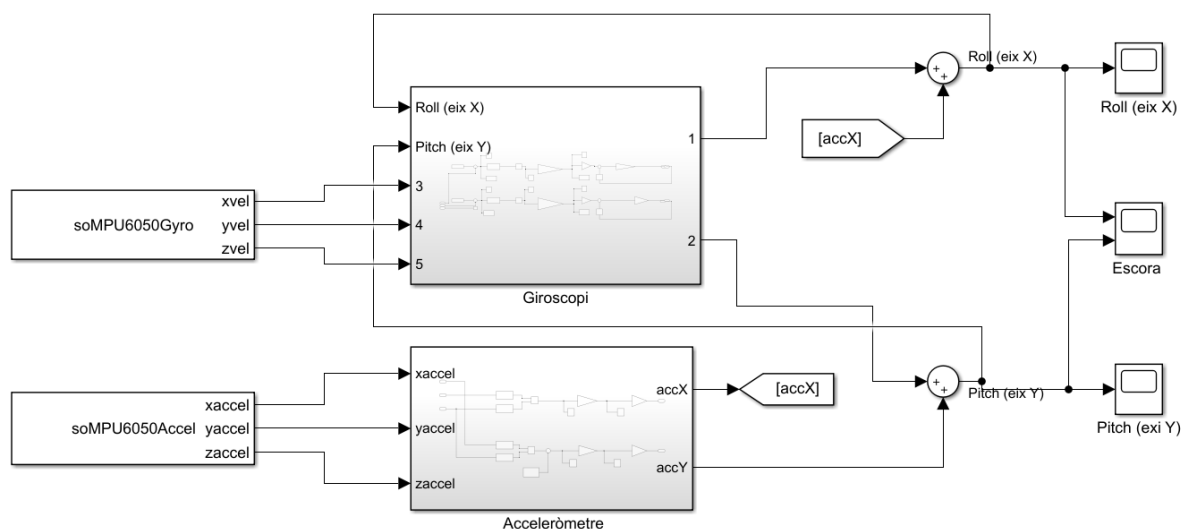


Figura 67. Sistema de presa de dades de la unitat IMU MPU6050

Les següents figures mostren el bloc Giroscopi i el bloc Acceleròmetre respectivament. En elles podem veure els escalats portats a terme en la fase de calibrat i la retroacció del giroscopi per tal d'evitar que amb el pas del temps els senyals tinguin una deriva.

Per la seva banda, el filtre complementari permet regular percentualment quin senyal té més aportació al resultat final per tal d'obtenir la senyal el més exacte possible.

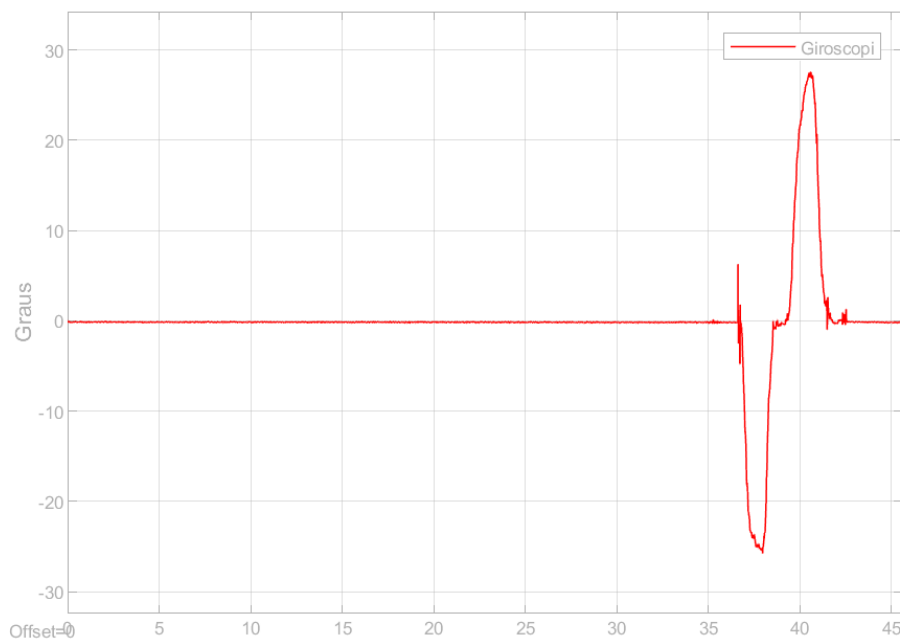


Figura 68. Angle extret del giroscopi

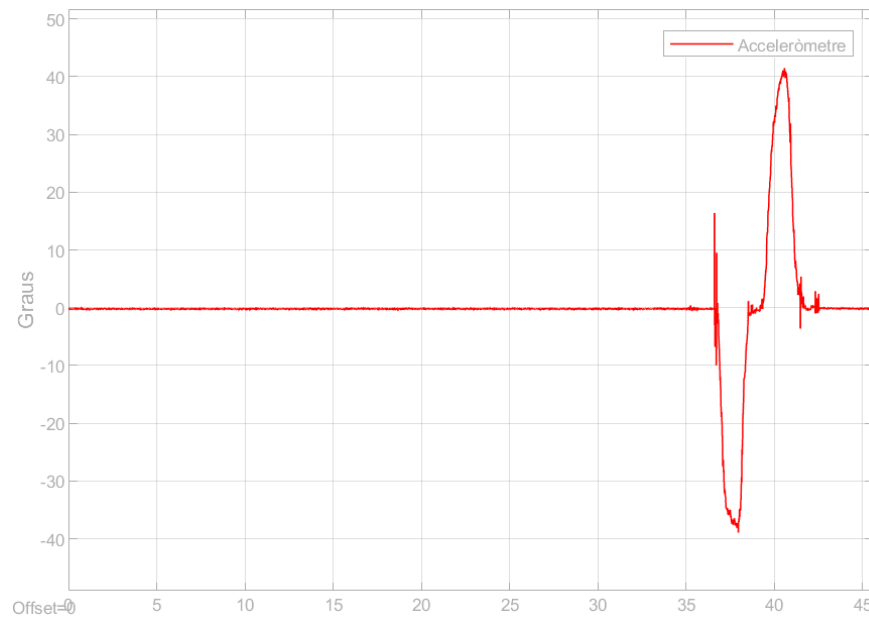


Figura 69. Angle extret de l'acceleròmetre

En la Figura 69, observem la sortida de l'acceleròmetre, però com podem deduir del comportament d'un acceleròmetre, és sensible a les acceleracions, per tant fa que la senyal tingui més soroll que la del giroscopi en cas de vibracions del sistema.

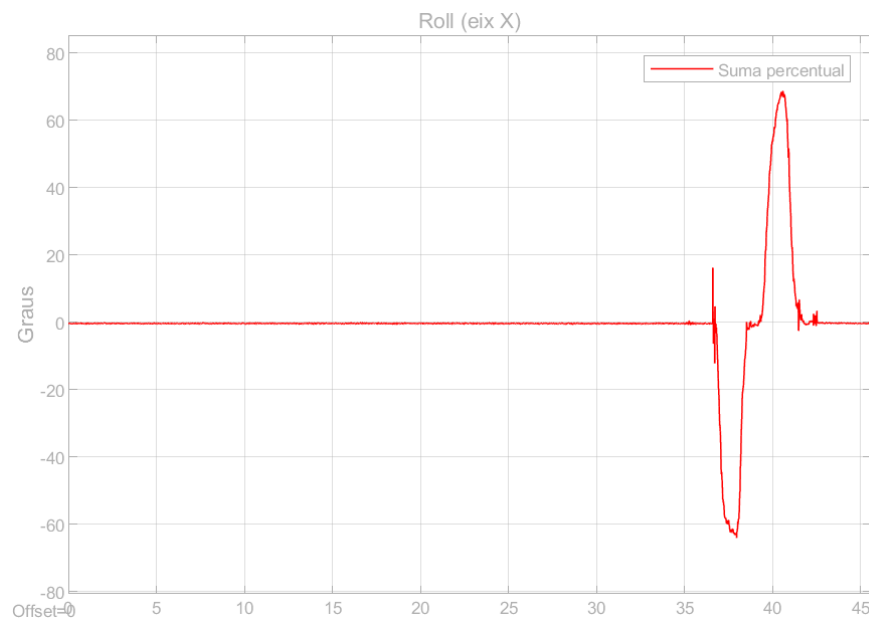


Figura 70. Angle a la sortida del filtre amb un 39% de giroscopi i un 61% d'acceleròmetre

En la figura anterior, podem veure la complementació percentual d'ambdós senyals anterior, per aconseguir una senyal el més acurada possible. Finalment en la figura següent, observem la senyal de sortida de la unitat IMU MPU6050, dels dos eixos que hem sensat.

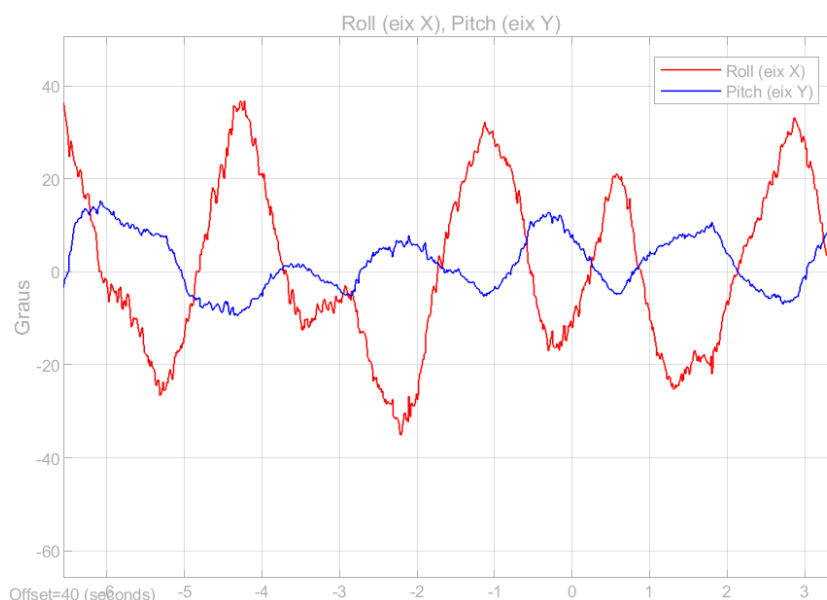


Figura 71. Senyal de sortida del sistema de sensat

7.2 Actuadors. Servomotor MG996R

Com ja hem vist anteriorment, com a actuator farem servir el servo motor MG996R, en aquest apartat en veurem les seves característiques i el mètode que farem servir per controlar-los:

Moment	13kg·cm	4,8 V	15 kg·cm	6V
Velocitat	0,17s/60º	4,8 V	0,13s/60º	6V
Arc de gir	120º (60º en cada direcció)			
Banda morta	5·10 ⁻⁶ s			

Taula 12. Característiques del Servomotor Font:[24]

També sabem que els servomotors controlen l'angle de sortida en funció de la durada d'impulsos elèctric com podem veure a la següent imatge.

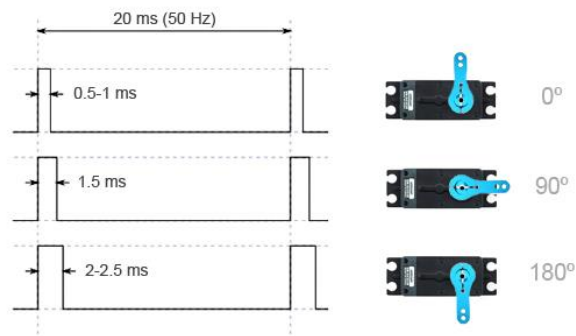


Figura 72. Impulsos de control del servo motor Font:[24]

Per al control dels servomotors MG996r, farem servir la llibreria Simulink *Support Package for Arduino Hardware*, que ens podem descarregar des de la web de Mathworks. En aquesta llibreria ens trobem els blocs de control de dispositius que podem connectar a la placa Arduino, i per controlar els servomotors, farem servir el bloc *Standard Servo Write*.

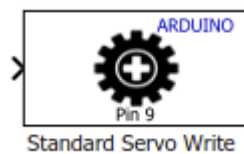


Figura 73. Bloc d'escriptura del servo motor pel simulink

7.3 Disseny del controlador

En aquest apartat veurem el mètode que s'ha dut a terme per al disseny del controlador del sistema digital. En primer lloc, hem portat terme una identificació experimental de la planta per tal de determinar les seves principals característiques dinàmiques.

7.3.1 Model de la planta

Aquest mètode consisteix en l'obtenció i anàlisi de les dades obtingudes directament del comportament del nostre model a fi d'obtenir el seu comportament dinàmic i això poder extreure'n una funció de transferència per dissenyar un controlador.

Abans de començar, veiem que tenim una matriu 2x2, per tant hauréu d'obtenir 4 funcions de transferència.

$$\text{Planta} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix}$$

G_{11} : Funció de transferència del servomotor de *roll* i el moviment de *roll*

G_{12} : Funció de transferència del servomotor de *roll* i el moviment de *pitch*

G_{21} : Funció de transferència del servomotor de *pitch* i el moviment de *roll*

G_{22} : Funció de transferència del servomotor de *pitch* i el moviment de *pitch*

A continuació per poder fer els experiment d'identificació es munta un sistema de llaç obert amb Simulink per poder-ne obtenir les dinàmiques de cada un dels servo motors.

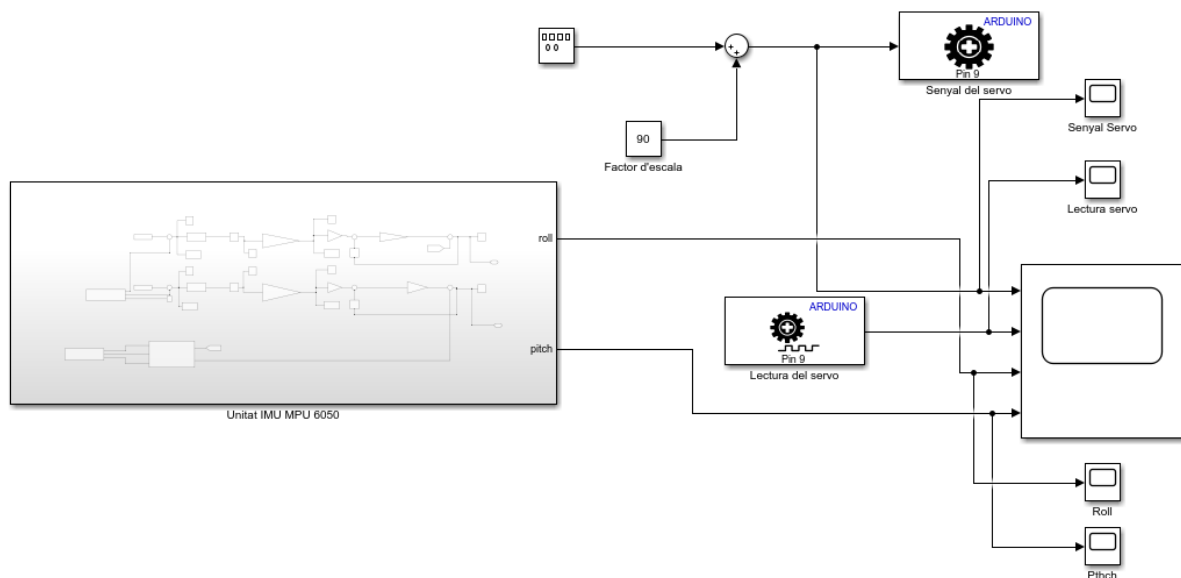


Figura 74. Llaç obert de control

Tal com veiem en la figura anterior, tenim dos blocs de simulink connectats al servo motor, un per enviar senyal i l'altre per rebre senyal de la seva posició, així com també observem que tenim un generador de funcions amb el que podrem variar l'amplitud, freqüència i forma de la ona que enviarem al servomotor. Finalment tot això va un scope a on podem veure la gràfica de cada senyal i també la del posició del model, ja que també hi ha entrades per el *pitch* i el *roll* que capta la unitat IMU MPU 6050.

Primer experiment

En el primer experiment excitem el servomotor de roll amb una ona sinusoidal, amb una amplitud de 40, i mesurem l'angle de *roll* i *pitch*. Començarem amb una ona sinusoidal i no escaló per no forçar el model el primer cop i així poder trobar els seus límits operacionals.

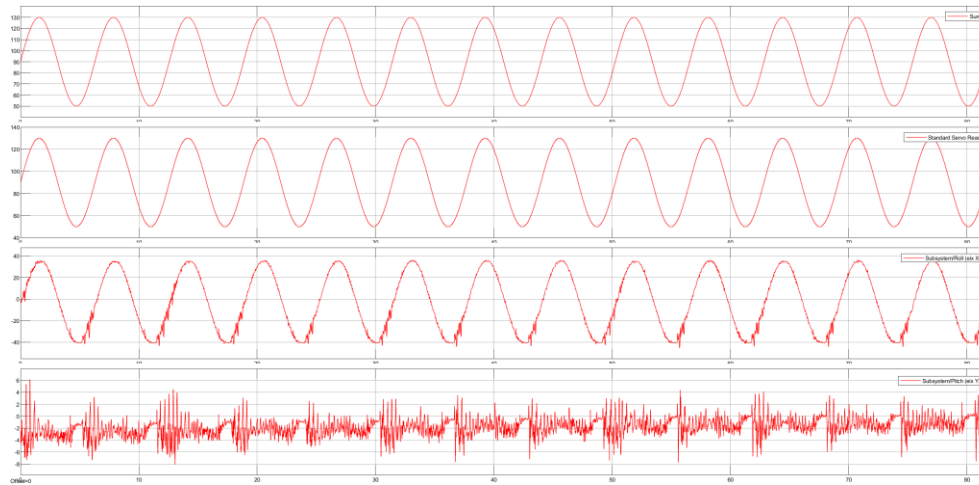


Figura 75. Ona sinusoidal de 40 graus d'amplitud per l'eix de *roll*

En la gràfica anterior podem observar el comportament amb els paràmetres anteriors de la funcions G_{11} i G_{12} . La primera gràfica és la senyal enviada al servo motor, la segona és la lectura de la posició del servo, la tercera és la que ens permet identificar G_{11} , és a dir, la posició de *roll* derivada d'excitar el servo de *roll*, i la quarta és la que ens permet identificar l'acoblament G_{12} , és a dir, la posició de *pitch* derivada d'excitar el servo de *roll*.

L'experiment es repeteix excitant el servomotor de *pitch* i mesurant *roll* i *pitch*. Veure figura següent.

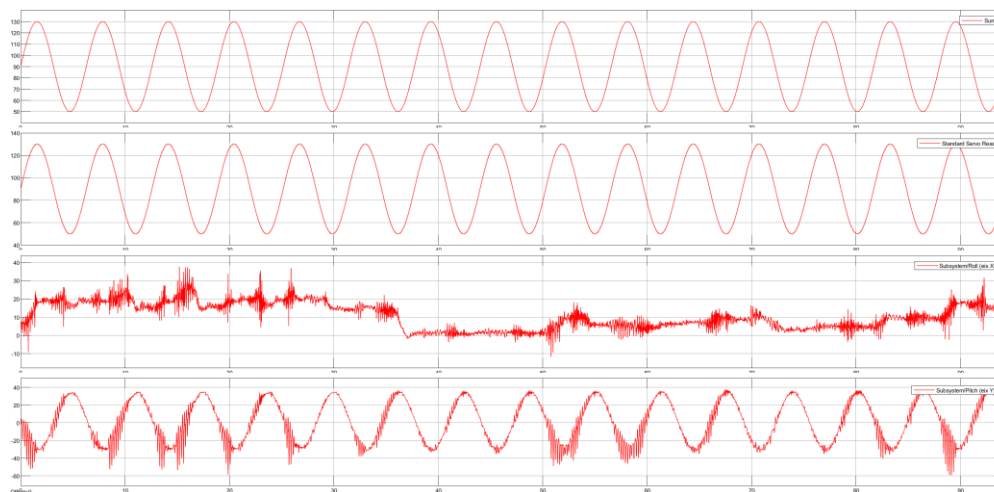


Figura 76. Ona sinusoidal de 40 graus d'amplitud per l'eix de *pitch*

En aquesta gràfica podem observar un comportament, podem dir, contrari a la gràfic anterior, ja que estem excitant el servo de *pitch*, per tant estem veient G_{21} i G_{22} .

D'aquest primer experiment en podem treure les següents conclusions:

- Els límits operacionals del sistema amb una resposta raonable són fins a una amplitud de 40 graus, a més graus observem que tot i funcionar ja hi ha massa soroll.
- Observem que hi ha una dominància diagonal, és a dir, ambdós servos creant un efecte pertorbador en l'altre:
 - En el cas del *roll*, observem que excita amb angles de 2 graus al servo de *pitch*.
 - En el cas del *pitch*, observem que excita amb angles de 10 graus el servo de *roll*.

Segon Experiment

El següent pas és repetir l'experiment amb els mateixos paràmetres però amb una ona quadrada, ja que és on veurem el comportament que ens ajudarà a obtenir les 4 funcions de transferència.

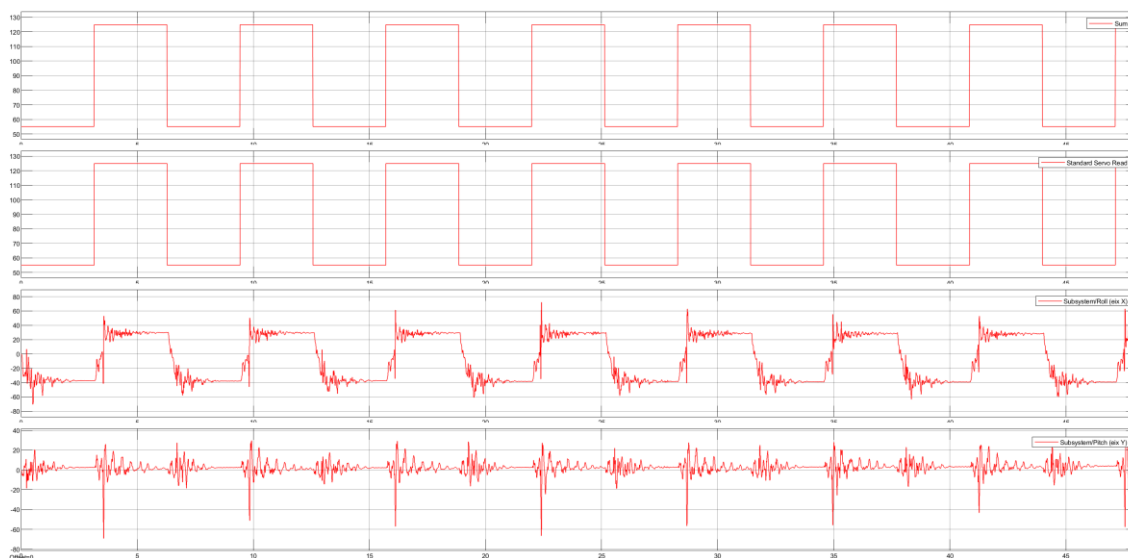


Figura 77. Ona escaló de 40 graus d'amplitud per l'eix de *roll*

En aquesta figura, igualment de les senyals que ens permeten obtenir les funcions G_{11} i G_{12} , podem observar millor el transitori i els temps d'establiment de cada flanc, tant de pujada com de baixada, així com el període d'oscil·lació.

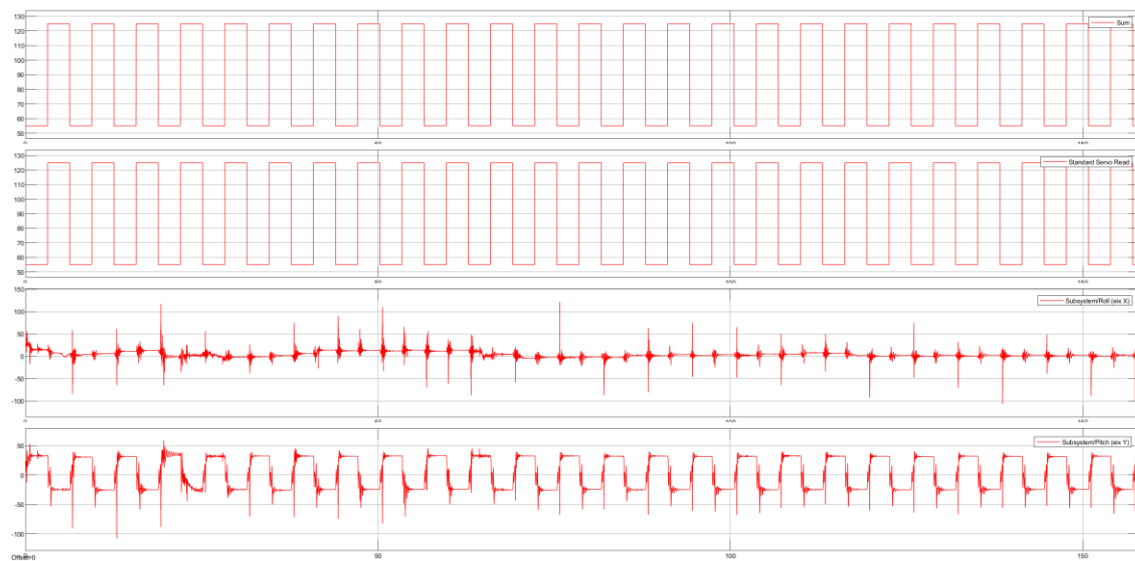


Figura 78. Ona escaló de 40 graus d'amplitud per l'eix de *pitch*

En les següent gràfiques veurem una ampliació de cada cas, en elles es representa el temps en segons a l'eix de les abscisses i l'amplitud en graus a l'eix de les ordenades.

Amb el color vermell delimitem els trams amb transitori de pujada per poder apreciar el temps que tarda en assolir un règim estable en cada oscil·lació i així extreure'n el temps d'establiment de cada funció. Tanmateix amb les línies de color verd delimitem el període de la senyal d'excitació.

Identificació de la funció de transferència G_{11}

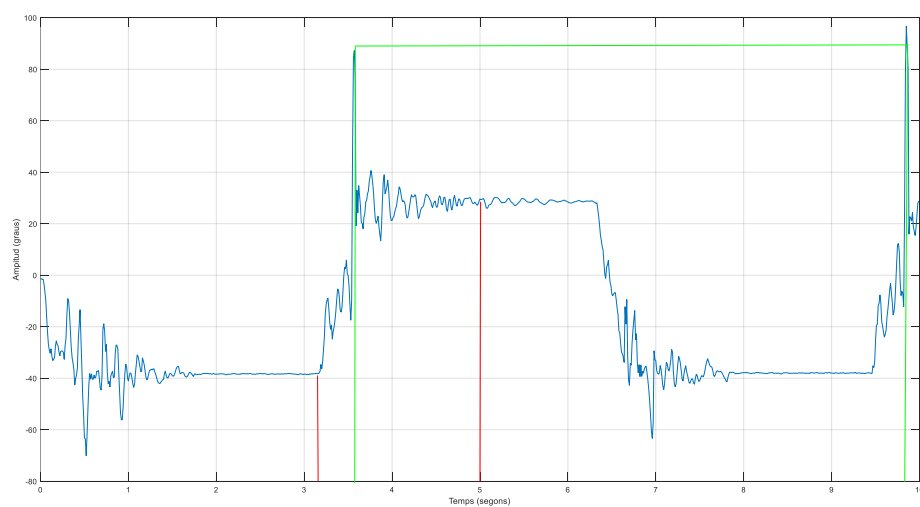


Figura 79. Comportament del roll davant l'escaló del servo de roll. Funció G_{11}

Identificació de la funció de transferència G_{12}

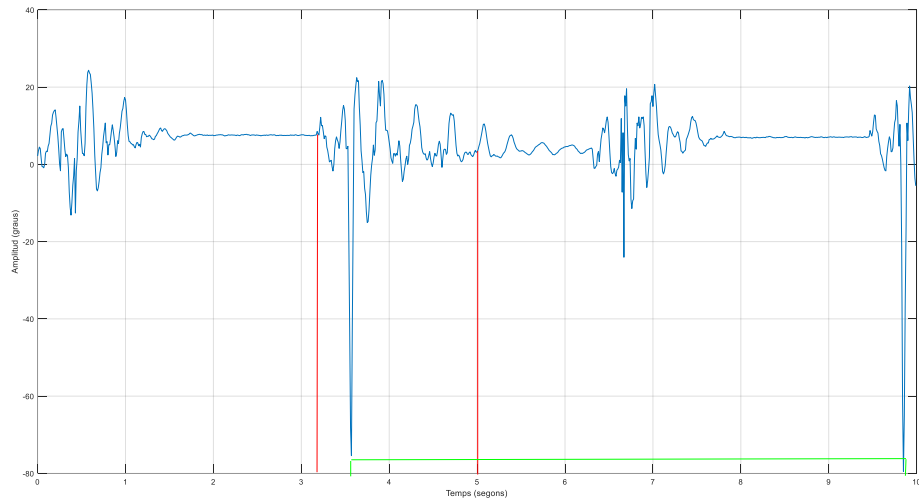


Figura 80. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de roll. Funció G12

Identificació de la funció de transferència G_{21}

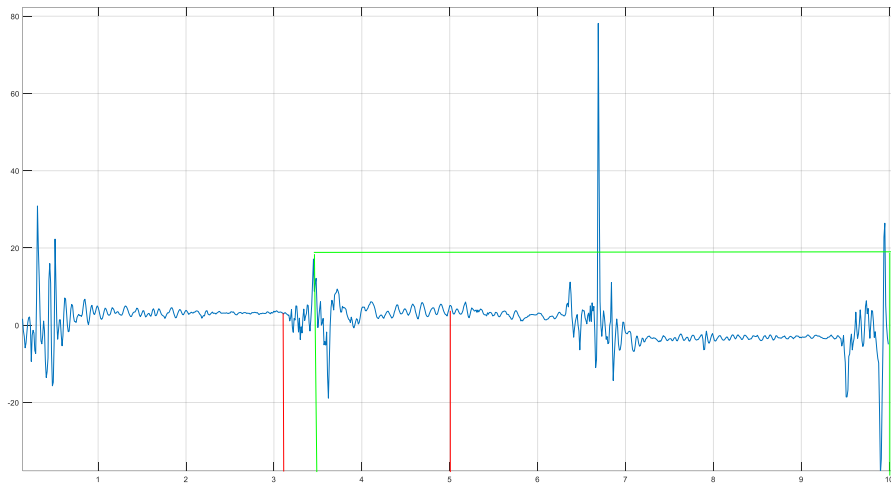


Figura 81. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de roll. Funció G21

Identificació de la funció de transferència G_{22}

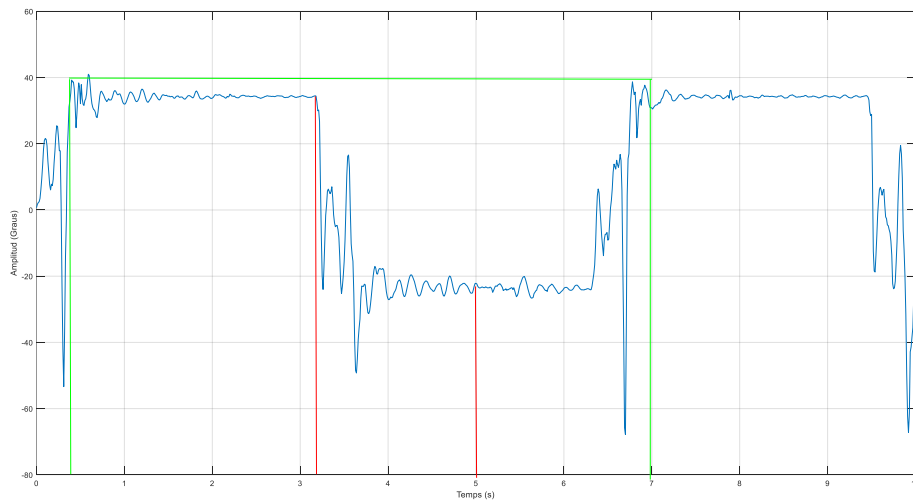


Figura 82. Comportament del pitch davant l'escaló del servo de pitch. Funció G_{22}

Així després d'analitzar les gràfiques anteriors podem veure que la dinàmica dominant és de primer ordre, amb uns pols paràsits complexos conjugats poc esmorteïts. Podem extreure els següent paràmetres:

Funció	Guany canònic	Temps d'establiment (s)	τ (s)	Freqüència de l'escaló (s)	Període d'oscil·lació entre pics petits
G_{11}	$30/125 = 0,24$	1'8	0,45	6'5	0,05s
G_{12}	$1/130 = 8 \times 10^{-3}$	1'8	0,45	6'25	0,05s
G_{21}	$0'5/125 = 4 \times 10^{-3}$	1'9	0,475	6'5	0,05s
G_{22}	$25/125 = 0,2$	1'9	0,475	6'5	0,05s

Taula 13. Resultats del segon experiment

La constant de temps τ s'ha calculat dividint el temps d'establiment entre 4.

Obtingudes aquestes dades ja podem predir més o menys quin tipus de planta tenim, observem que cada funció de transferència consta de 2 parts, de mode que tenim una dinàmica dominant de primer ordre G_1 amb un mode ressonant molt poc esmorteït G_2 , llavors cada planta té la forma següent $G = G_1 + G_2$, essent:

$$G_1 = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{k \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

Aquests models poden servir per dissenyar controladors basats en models. Tot i que s'han fet diversos assajos (per Ziegler Nichols, disseny amb l'ajut del lloc d'arrels d'Evans) cap d'ells ha donat resultats satisfactoris.

El motiu és que els models obtinguts són lineals i no capten tota la complexitat de la planta. Al fer els experiments ens hem adonat que la planta presenta fenòmens no lineals (hi ha una lleugera fricció seca, també respon lleugerament diferent segons quin sigui l'angle inicial,...) i també presenta soroll (degut a vibracions, etc.). Tots aquests fenòmens no estan contemplats en el model i per tant els controladors tampoc ho tondran en compte.

En tot cas, a la vista dels guanys canònics de les plantes de fora de la diagonal, és interessant veure que podem fer la hipòtesi de dominància diagonal i plantejar-nos de fer un control amb llaços independents, és a dir

$$\text{Planta} \approx \begin{pmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{12} \end{pmatrix}$$

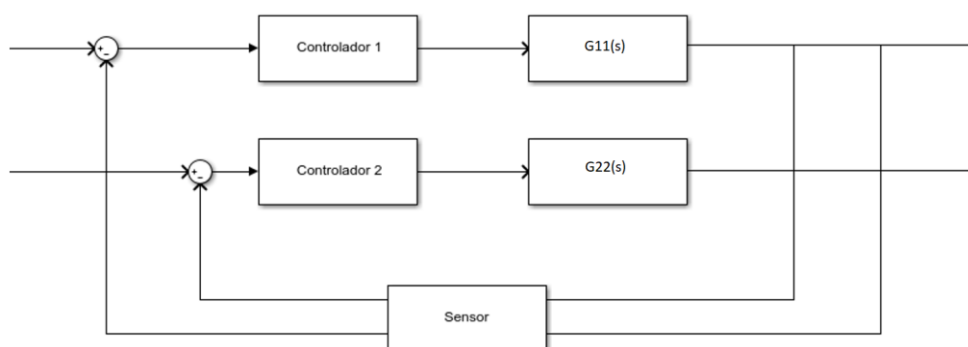


Figura 83. Configuració del llaç de control

7.3.2 Configuració del llaç de control

El primer pas és dividir ambdós graus per separat per tal de poder fer 2 llaços de control equivalents. A la present memòria només mostrarem el procediment per l'eix de *roll*, ja que per l'eix de *pitch* és exactament igual però connectant l'altre sortida del sensor MPU6050.

Roll

Per realitzar-ho només connectarem el servo de *roll* per tal que el *pitch* no influènciï en les mesures. Per fer-ho realitzarem el següent bloc de Simulink per tal poder extreure resultats només del *roll*.

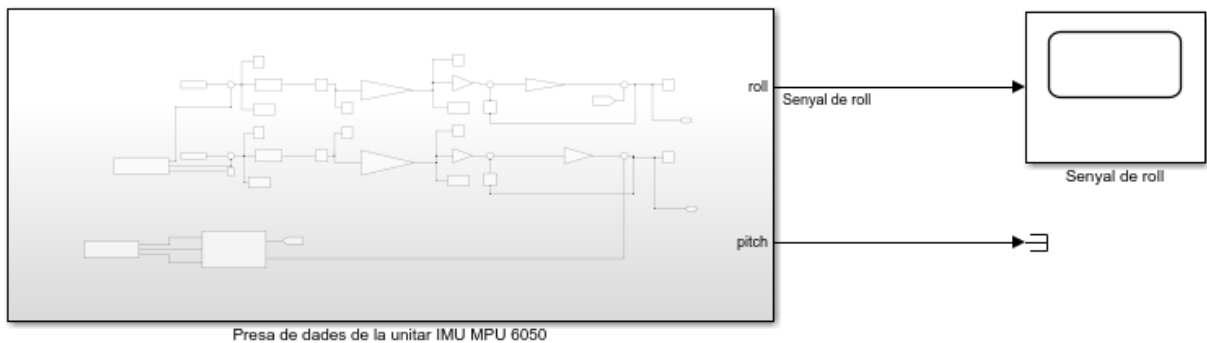


Figura 84. Configuració del MPU sense filtre

Mentre fèiem els experiments d'identificació i hem assajat els primers controladors, ens hem adonat que les mesures eren molt sorolloses. En el cas del llaç tancat això fa que els servomotors vibrin molt.

Per disminuir el soroll, ubiquem un filtre a base de retards per fer una mitjana de la senyal i així extreure una senyal més uniforme per ajudar al sensor IMU MPU 6050 a tenir una millor referencia.

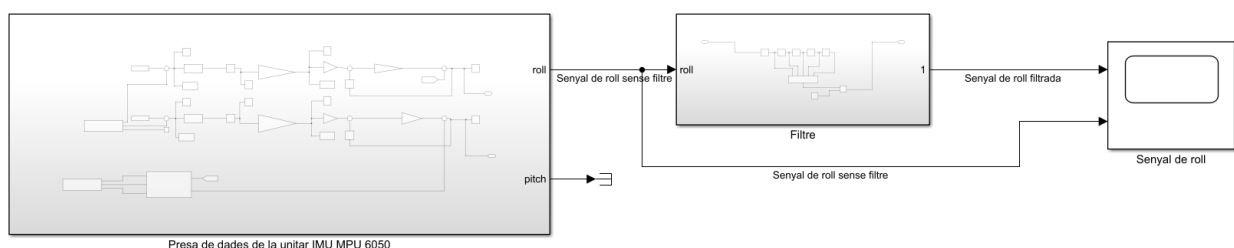


Figura 85. Configuració del MPU amb filtre

La següent figura mostra com hem implementat el filtre. Com podem observar en la següent imatge tenim retards unitaris per tal de suavitzar la senyal de *roll*.

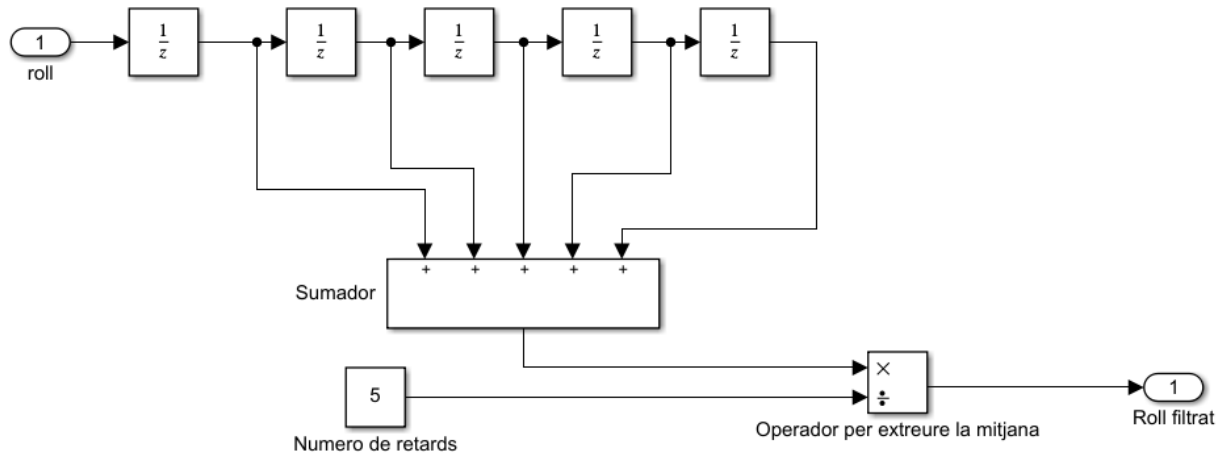


Figura 86. Filtre de la senyal del MPU

La següent figura mostra les mesures abans i després del filtre:

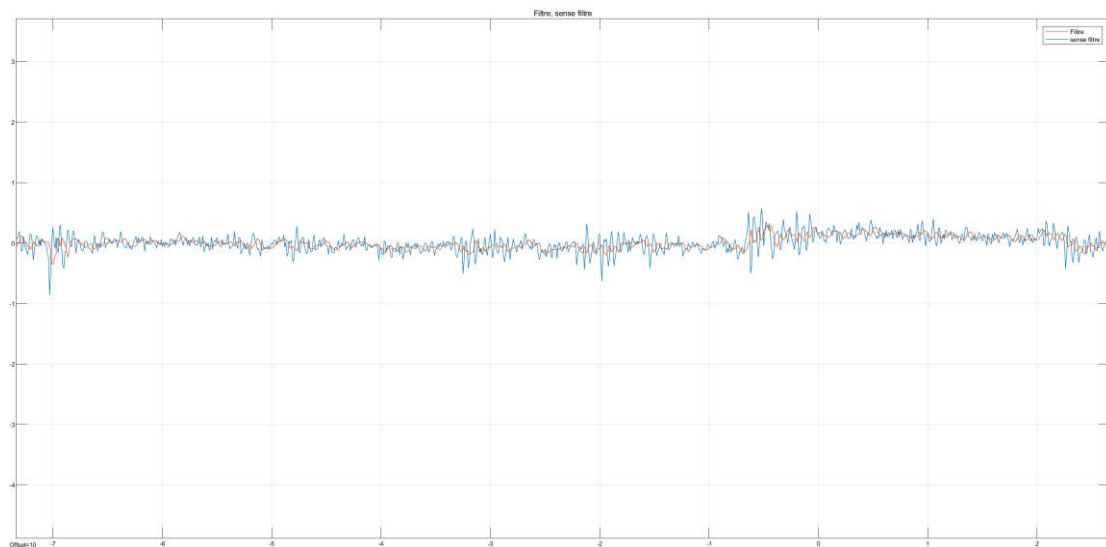


Figura 87. Comparació de la senyal amb filtre i sense filtre

El següent pas es enviar una senyal de control al servo motor, per fer-ho comparem la mesura amb el valor desitjat de l'angle i passem aquest error per un controlador proporcional.

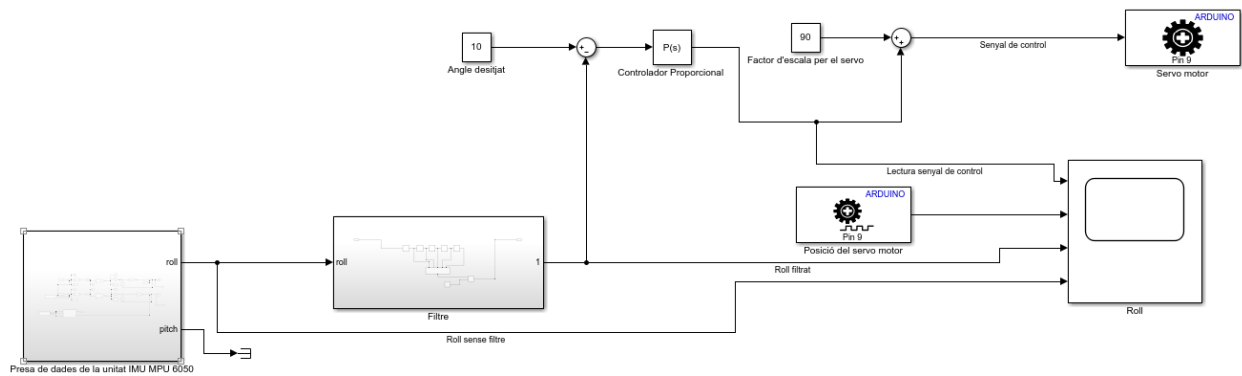


Figura 88. Configuració del llaç amb control proporcional i retroacció negativa

Observem que efectivament el sistema és estable, es comporta com nosaltres desitgem i va buscar el punt preestablert. Per veure-ho, tenint el model a 0 graus, el forcem a que és situï a un angle desitjat de 10 graus. Veure figura següent.

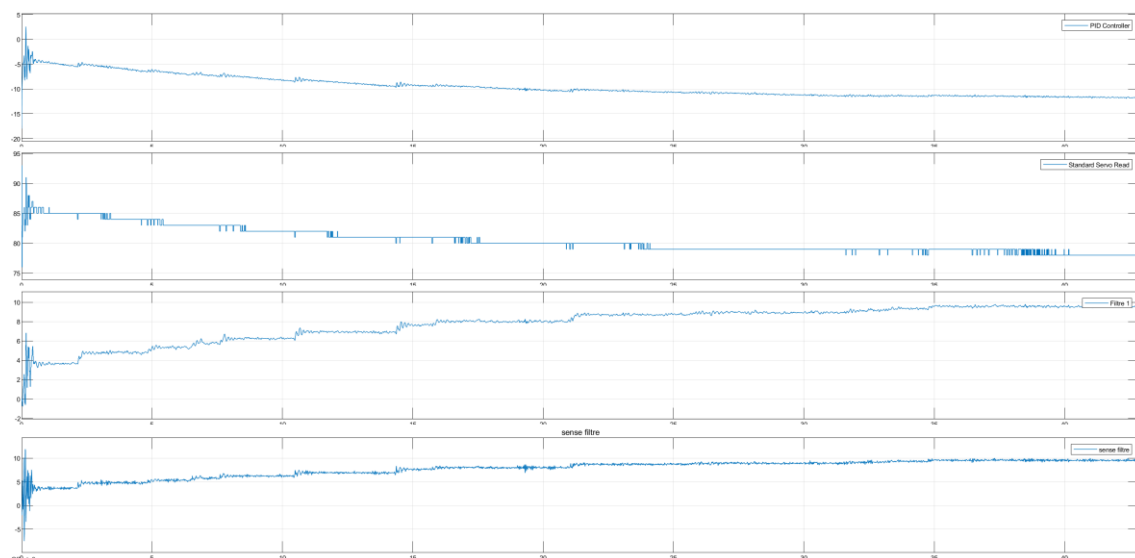


Figura 89. Comportament del controlador proporcional

A la figura anterior observem el comportament del controlador proporcional, les gràfiques s'organitzen de la següent manera:

- Gràfica 1: Controlador
- Gràfica 2: Lectura de la posició del servo
- Gràfica 3: Lectura del MPU6050 amb filtre
- Gràfica 4: Lectura del MPU6050 sense filtre

Observem però, que el sistema tarda molt temps en assolir el punt desitjat i a més no s'estabilitza al punt desitjat. Per resoldre-ho, assagem un altre controlador. Ara posem un Proporcional Integral amb una valor de 0,5 i ajustem el guany del llaç a 1,2.

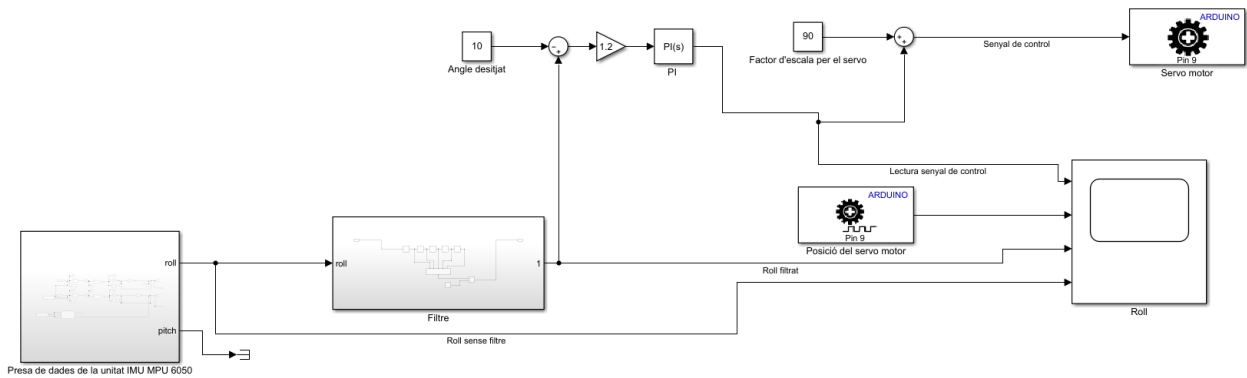


Figura 90. Configuració del llaç de control amb controlador PI

Figura 91. Comportament del control PI

Hem fet la resposta més ràpida i tenim error nul en règim permanent.

Per tal de veure si hi havia millora en el comportament, hem afegit acció derivativa amb un valor de 0,01 per tal d'obtenir un controlador PID. L'acció derivativa en general millora l'estabilitat relativa del sistema.

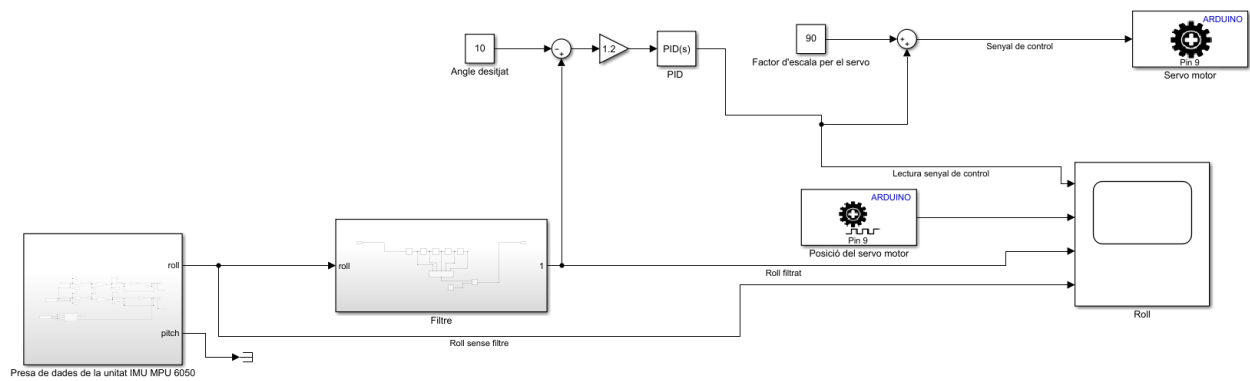


Figura 92. Configuració amb control PID

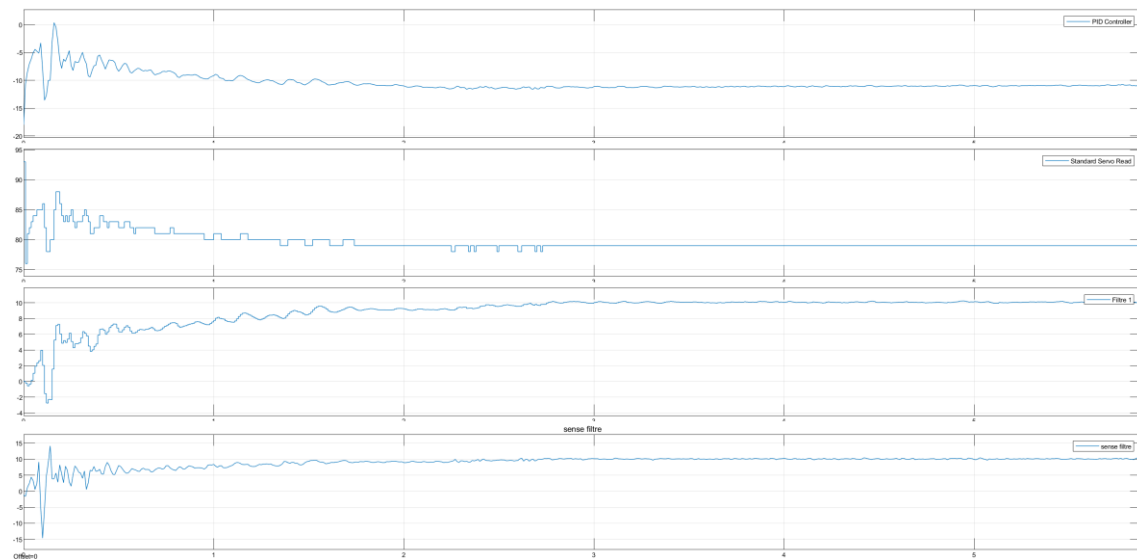


Figura 93. Comportament del control PID

La figura mostra el comportament del PID. Veiem que la part derivativa no millora substancialment el comportament de manera que haurà de ser zero o molt petita.

Per a sintonitzar el controlador es farà de manera empírica, és a dir buscant i assajant la combinació entre els valors de cada component per tal d'aconseguir una resposta adequada. La següent taula mostra diferents combinacions de paràmetres i el comportament observat. Notar que la inclusió d'un integrador, si aquest és petit, a la pràctica no és capaç d'eliminar l'offset del tot, això és degut a que ja s'ha comentat anteriorment. La planta física té un component no lineal (fricció seca...).

Ajustament dels paràmetres del PID per el moviment de *roll*

	P	I	D	k	4τ	Comportament observat
1	0,1	0	0	1	35 segons	Estable amb offset
2	0,1	0,1	0	1	28 segons	Estable amb offset
3	0,1	0,1	0	1,1	28 segons	Estable amb offset
4	0,1	0,1	1e-3	1,1	29 segons	Estable però més lent
5	0,1	1	1e-3	1,1	27 segons	Transitori amb soroll
6	0,1	2	1e-3	1,1	10 segons	Amb Soroll
7	0,1	2	1e-6	1,1	10 segons	Transitori amb soroll
8	0,5	2	1e-6	1,1	10 segons	Estable amb soroll
9	0,5	2'5	1e-6	1,1	4 segons	Estable amb soroll
10	0,5	3	1e-6	1,1	2 segons	Inestable en el règim permanent
11	0,5	2,8	1e-6	1,1	3 segons	Estable amb soroll
12	0,5	2,8	1e-3	1,1	2,6-3 segons	Estable amb soroll al transitori

Taula 14. Primer ajustament dels paràmetres del PID de *Roll*

Extrèiem que per el nostre projecte la combinació més adequada per el moviment de *Roll* és la següent:

P	I	D	K
0,5	2,8	1e-3	1,1

Taula 15. Primer resultat dels paràmetres del llaç de *Roll***Ajustament dels paràmetres del PID per el moviment de *pitch***

	P	I	D	k	4τ	Comportament
1	0,1	0	0	1	40 segons	Estable amb offset
2	0,1	0'1	0	1	30 segons	Estable amb offset
3	0,1	0'1	0	1,1	30 segons	Estable amb offset
4	0,1	0'1	1e-3	1,1	32 segons	Estable però més lent
5	0,1	1	1e-3	1,1	28 segons	Transitori amb soroll

6	0,1	1	1e-3	1,2	15 segons	Transitori amb soroll
7	0,1	1	1e-6	1,1	16 segons	Transitori amb soroll
8	0,5	1	1e-6	1,1	12 segons	Estable amb soroll
9	0,5	1'2	1e-6	1,1	4 segons	Estable amb soroll
10	0,5	1'2	1e-5	1,1	2 segons	Inestable en el règim permanent
11	0,5	1'2	1e-4	1,3	3 segons	Estable amb offset
12	0,2	1'2	1e-4	1,3	3 segons	Estable amb offset

Taula 16. Primer ajustament dels paràmetres del PID de *Pitch*

Extrèiem que per el nostre projecte la combinació més adequada per el moviment de *Roll* és la següent:

P	I	D	K
0,2	1,2	1e-4	1,3

Taula 17. Primer resultat dels paràmetres del llaç de *Pitch*

No obstant també observem en la següent figura que hi ha molt soroll i sobtadament el sistema adopta intervals amb molta inestabilitat.

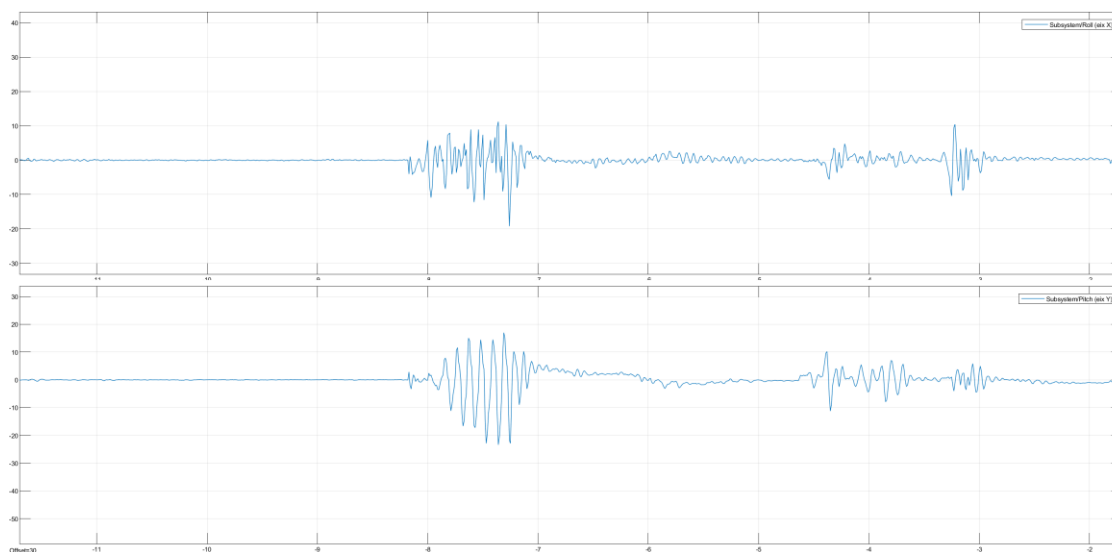
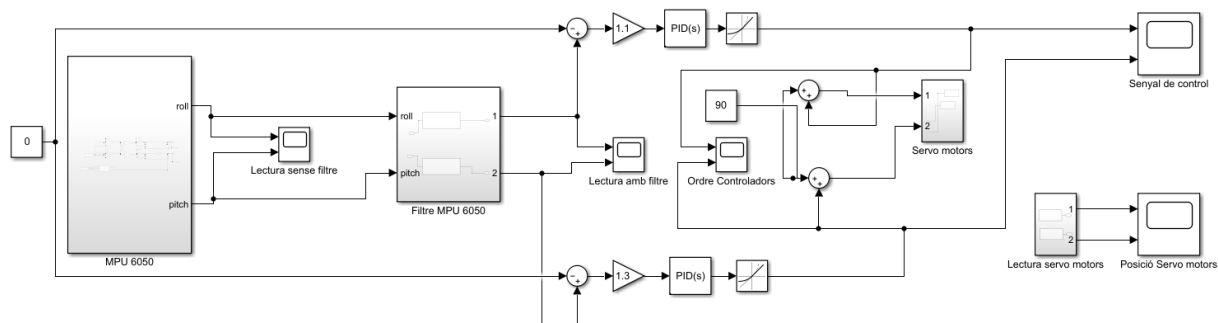


Figura 94. Pertorbacions sobtades del model digital

Aquestes perturbacions s'expliquen perquè la senyal de control reacciona massa ràpid/bruscament als pics de mesura. Per intentar solucionar aquest problema agreguem un bloc anomenat 'rate limiter' que el que ofereix és una limitació en la pendent de la senyal de control, de forma que obtenim una senyal més suau. Els valors de limitació han sigut de -50 a 50.


Figura 95. Configuració amb *rate limiter*

La figura mostra la senyal de control sense i amb limitació de la pendent.

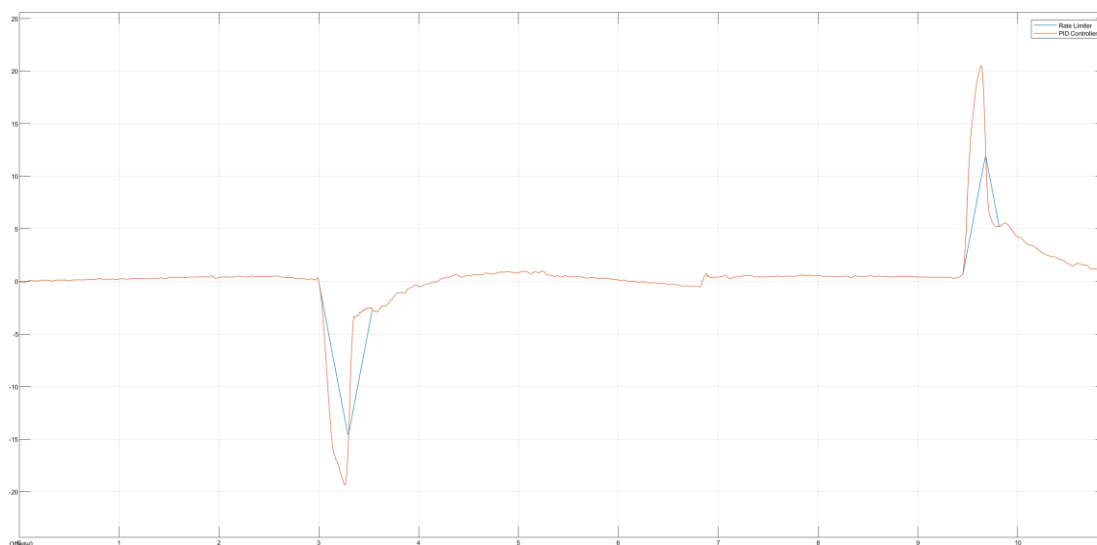


Figura 96. Comportament del rate limiter

Comparació dels diferents paràmetres del llaç de control

En aquest apartat decidirem mitjançant la comparació quin serà de configuració final del llaç de control. Aquesta comparació per una posterior decisió final en farà en base als objectius principals establerts a l'inici d'aquest capítol.

En tindrem en compte cadascuna de les parts que configuren el PID, el guany canònic i els bloc del 'rate limiter' que hi ha en el llaç de control de control, els paràmetres que determinen els resultat són el temps d'establiment i el comportament durant el transitori, és a dir, si hi ha molt soroll o perill d'inestabilitat del sistema.

Per a la realització de la comparació es forçarà al sistema a assolir una escora de 10 graus sobre una superfície plana.

Comparació dels paràmetres per el moviment de *Roll*

	P	I	D	k	Rate limiter	4τ	Comportament
1	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-10:10)	5 segons	Amb Soroll
2	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-20:20)	4,5 segons	Estable
3	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-30:30)	4,5 segons	Estable
4	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-40:40)	4 segons	Estable
5	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-50:50)	2,7 segons	Estable
6	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-60:60)	2,6 segons	Amb Soroll
7	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-65:65)	2,6 segons	Amb Soroll
8	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-70:70)	1,8 segons	Amb Soroll
9	0,5	2,8	1e-3	1,1	(-100:100)	1,8 segons	Amb Soroll

Taula 18. Rate limiter per el *Roll*

De la taula anterior en podem extreure unes quantes conclusions per tal d'ajudar-nos a seleccionar una configuració de llaç de control adient a les nostres especificacions.

- Per un 'rate limiter' amb amplituds superior a 60-70 podem observar que el comportament de la senyal es pràcticament igual a no disposar d'aquest bloc.
- Per un 'rate limiter' amb amplituds inferior a 40 podem observar que el comportament de la senyal està massa limitada i indueix a un major temps d'establiment.

Per tant ens quedem amb l'elecció d'aplicar una 'rate limiter' amb una amplitud limitada a 50. No obstant veiem que tenim un temps d'establiment d'aproximadament 2,7-3 segons i seria interessant disminuir aquest temps, així que ara intentarem reajustar els paràmetres per trobar una millor combinació amb els demes paràmetres del llaç de control.

Sabent que el que volem és augmentar la resposta per tenir un menor temps d'establiment haurem d'augmentar la part integral del llaç de control però sempre tenint en compte de no crear inestabilitat en el sistema.

	P	I	D	k	Rate limiter	4τ	Comportament
1	0,5	2,9	1e-3	1,1	(-50:50)	2,6 segons	Estable
2	0,5	3	1e-3	1,1	(-50:50)	2,3 segons	Estable
3	0,5	3,5	1e-3	1,1	(-50:50)	2 segons	Estable
4	0,5	4	1e-3	1,1	(-50:50)	1,5 segons	Inestable

Taula 19. Segon ajustament dels paràmetres del PID del *Roll*

Comparació dels paràmetres per al moviment de *Pitch*

	P	I	D	k	Rate limiter	4τ	Comportament
1	0,2	1,2	1e-4	1,3	(-10:10)	10 segons	Amb Soroll
2	0,2	1,2	1e-4	1,3	(-20:20)	10 segons	Estable
3	0,2	1,2	1e-4	1,3	(-30:30)	8 segons	Estable
4	0,2	1,2	1e-4	1,3	(-40:40)	8 segons	Estable
5	0,2	1,2	1e-4	1,3	(-50:50)	8 segons	Estable

Taula 20. Rate limiter per el *Pitch*

En aquest cas veiem que tenim temps de resposta molt elevats per tant reajustarem els paràmetres del PID igual que hem fet amb el moviment de *roll*.

	P	I	D	k	Rate limiter	4τ	Comportament
1	0,2	2,8	1e-4	1,3	(-10:10)	5 segons	Amb Soroll
2	0,2	2,8	1e-4	1,3	(-20:20)	4,5 segons	Estable
3	0,2	2,8	1e-4	1,3	(-30:30)	4 segons	Estable
4	0,2	2,8	1e-4	1,3	(-40:40)	3segons	Estable
5	0,2	2,8	1e-4	1,3	(-50:50)	2,7 segons	Estable
6	0,5	2,8	1e-3	1,3	(-50:50)	2,4 segons	Estable
7	0,5	2,8	1e-3	1,3	(-60:60)	1,9-2 segons	Amb Soroll
8	0,5	2,8	1e-3	1,3	(-65:-65)	1,8-2 segons	Amb Soroll

Taula 21. Segon ajustaments dels paràmetres del PID del *Pitch*

Finalment com a resultat final podem extreure que la configuració òptima del llaç de control és la següent:

P	I	D	k	Rate limiter	4τ	Grau de llibertat
0,5	3,5	1e-3	1,1	(-50:50)	2 segons	<i>Roll</i>
0,5	2,8	1e-3	1,3	(-50:50)	2,4 segons	<i>Pitch</i>

Taula 22. Valors finals del llaç de control

Aquesta conclusió s'ha tingut obtingut tenint en compte que els materials de construcció, és a dir, el contraxapat i els components no són del tots òptims per aquest model, ja que hi ha fricció seca permanent que crea un soroll constant en totes les senyals que no es pot eliminar però ho considerem com a factor a tenir en compte per a propers projectes en base a aquest.

7.4 Sistema elèctric i electrònic

En aquest apartat mostrarem les connexions i elements dels sistemes elèctric i electrònic que s'han usat per a la realització d'aquest projecte.

7.4.1 Sistema elèctric del model digital

Per tal de subministrar la potència necessària per dotar al sistema per poder funcionar correctament, s'utilitza una pila de 9V connectada a la placa Arduino Mega.

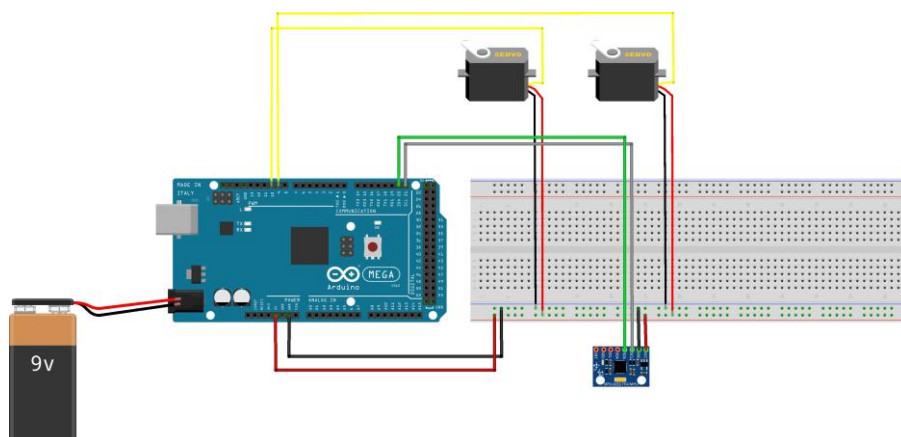


Figura 97. Connexions del model digital

En la imatge anterior en podem veure l'esquema connectat mitjançant una placa de proves de com queda la configuració global de tots els dispositius electrònics.

7.4.2 Sistema electrònic del model digital

Per projectar el model elèctric s'ha fet servir el programa Fritzing.



Figura 98. Logotip de Fritzing Font: [38]

És un programa lliure d'automatització de disseny electrònic que ens permet projectar els nostres projectes electrònics digitalment. Creat amb el principi del 'processing' i 'arduino', permet crear el prototip del projecte partint des de la placa de proves fins al disseny de les nostra pròpia placa PCB. Tant mateix també ofereix també la possibilitat d'extreure un esquema elèctric del prototip així com simular un codi, en diferents llenguatges, en cas de ser necessari.

Així l'esquema elèctric del nostre model digital és el següent.

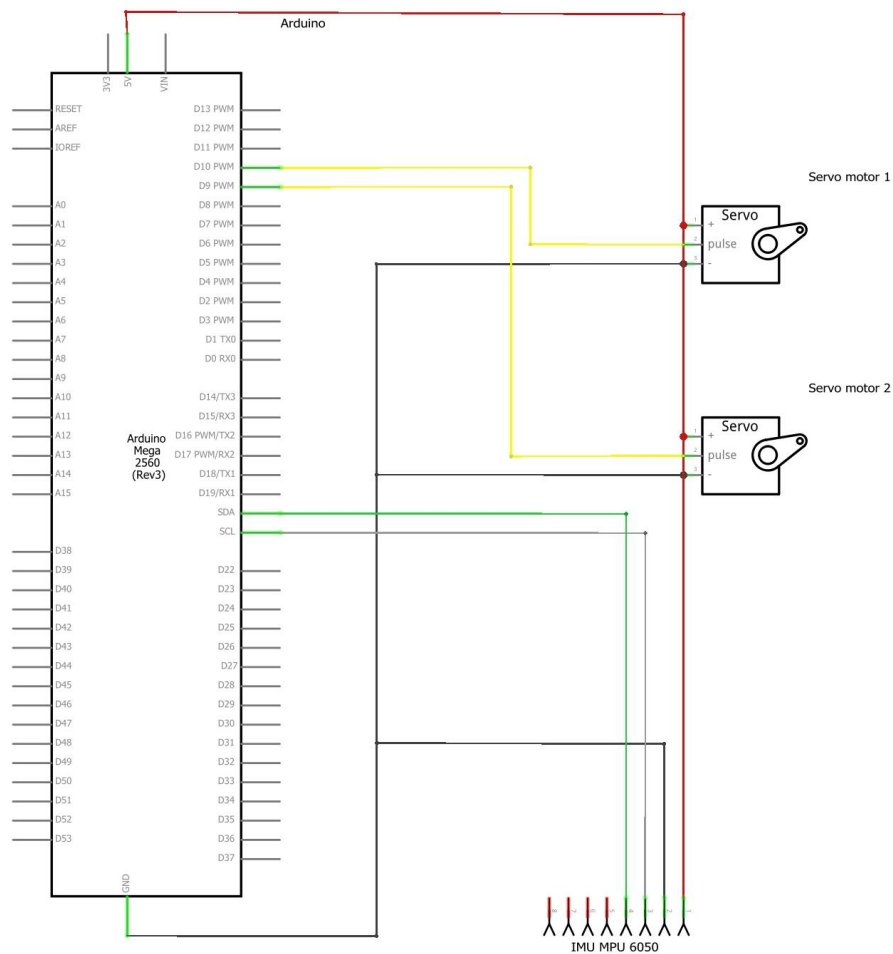


Figura 99. Esquema elèctric del sistema digital

Com podem observar, tenim 2 línies comunes de connexió a tots els dispositius, la vermella d'alimentació a 5V i la negra de Terra, els dos servomotors connectats als pins digital amb PWM, 9 i 10, i la unitat IMU MPU 6050, té dos punts de connexió, un a SDA i l'altre a SCL.

Capítol 8. Proves i Resultats

En aquest capítol veurem les proves realitzades en els models per posteriorment poder valorar quins són els avantatges i inconvenients de cadascun.

Així doncs ambdós models seran sotmesos a les mateixes 3 proves.

8.1 Banc de proves

Per realitzar les proves amb els models, es farà servir la ‘balancing ball’ de la companyia Acrome, que disposa de 2 servo motors que es poden controlar amb un Arduino. Aquests servomotors permeten canviar l’angle de roll i de pitch de la plataforma, simulant les onades a alta mar.



Figura 100. Balancing Ball, de la companyia Acrome que farem servir com a sistema de balanceig

Per tal de poder controlar els angles, formes d’ones i freqüència als quals es sotmetran els model, hem creat un model de Simulink que ens permetrà controlar-ho.

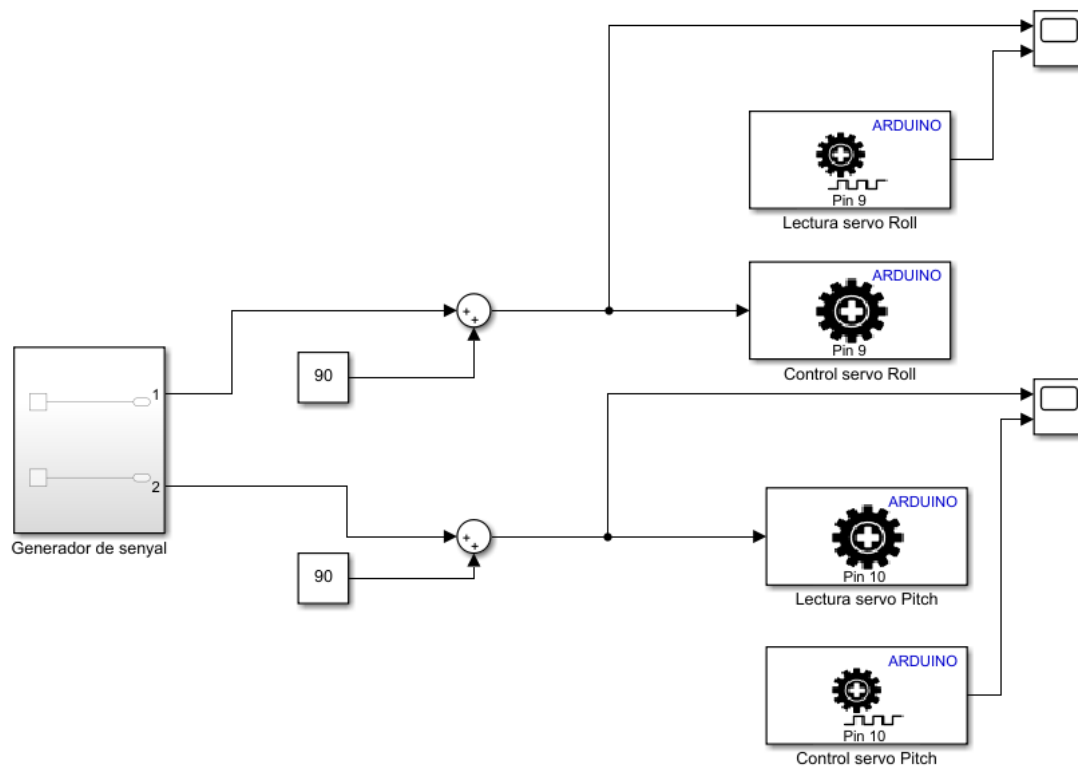


Figura 101. Sistema de control del sistema de balanceig

8.2 Proves

En aquest apartat veurem les proves realitzades per poder valorar el comportament de cadascun dels models.

8.2.1 Prova 1

La primera prova consisteix en posar a prova el temps de reacció del model davant perturbacions per el moviment de *roll*, és a dir, estabilitat de l'eix x.

Per valorar els resultats, es pertorbarà el model incrementant l'angle dels servos de control de la plataforma 10 graus per a cada banda, fins assolir els 80 graus Tanmateix també servirà per trobar els marges d'acció així com possibles bandes mortes per angles molt petits.

8.2.2 Prova 2

La segona prova consisteix en repetir el mateix experiment però per el moviment de *pitch*.

8.2.3 Prova 3

La tercera i darrera prova consisteix en la combinació d'ambdós graus de llibertat per observar els models davant d'una situació el més real possible, els angles per els quals seran pertorbats seran aleatoris doncs tot i que les ones poden mostrar patrons l'objectiu d'un sistema d'estabilització es poder mantenir l'embarcació estable davant de qualsevol tipus de pertorbacions.

8.3 Resultats de les proves

En aquest apartat veurem els resultats de les proves realitzades en els punts anteriors per a cadascun dels models, tant el digital com el mecànic.

8.3.1 Resultat prova 1 Sistema Digital

En aquest apartat veurem el resultat de la prova 1 realitzada al model digital. En les imatges que veurem a continuació hi trobarem 3 gràfiques, que representen el següent:

- Gràfica superior, mostra l'angle real en el que es troba el model per tal de poder saber en tot moment el comportament real de sistema d'estabilització.
- Gràfica del mig, mostra el senyal de control que s'envia al servomotor passada pel 'rate limiter' per tal de poder saber quina es la resposta de control que envia el PID cap als actuadors.
- Gràfica inferior, mostra la posició del servo en angles per tal de saber en quina posició es troba en cada moment i poder valorar els resultats.

Exceptuant la gràfica de la prova 3, en 2 columnes i dues files amb la següent distribució. En el cas de les columnes començant d'esquerra a dreta, ens trobem la lectura del MPU6050, la senyal del 'rate limiter' i la posició del servomotor del sistema de balanceig. A la fila superior ens trobem l'eix x i a la inferior l'eix y .

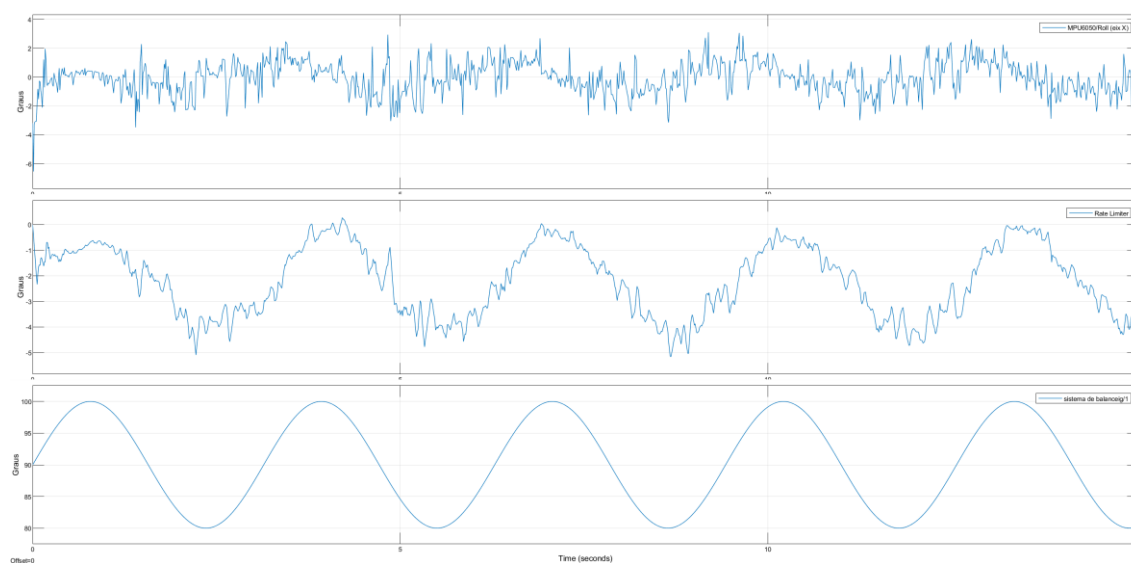


Figura 102. Prova 1, servomotor a 10 graus

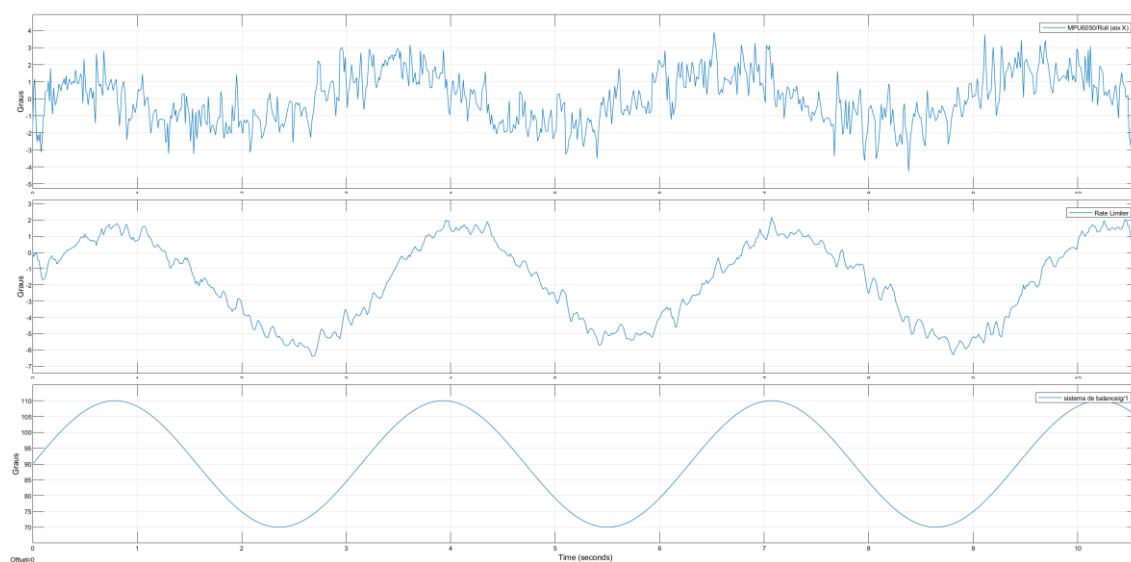


Figura 103. Prova 1, servomotor a 20 graus

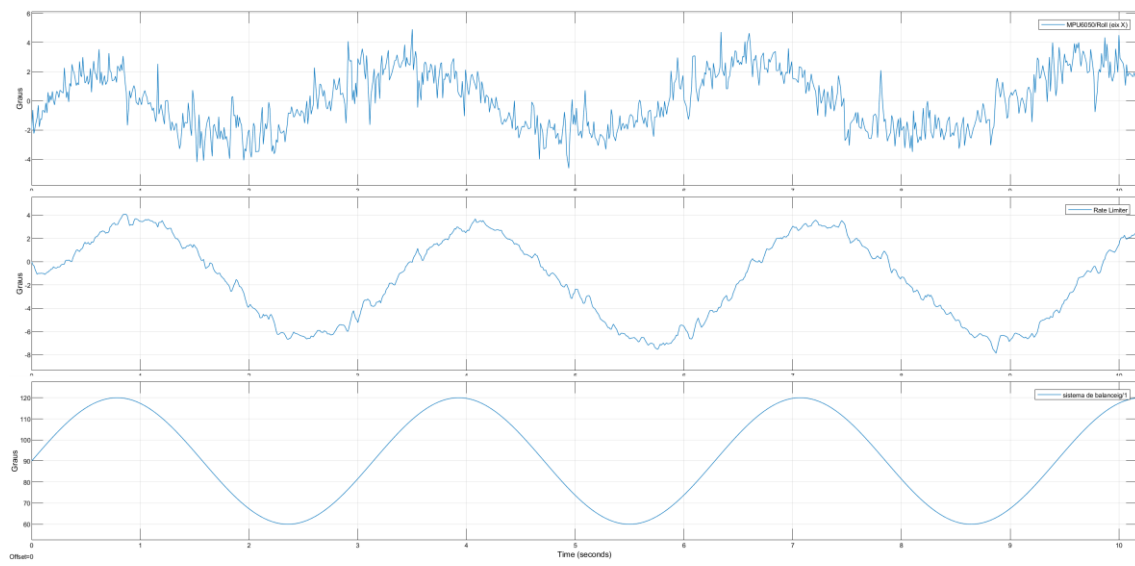


Figura 104. Prova 1, servomotor a 30 graus

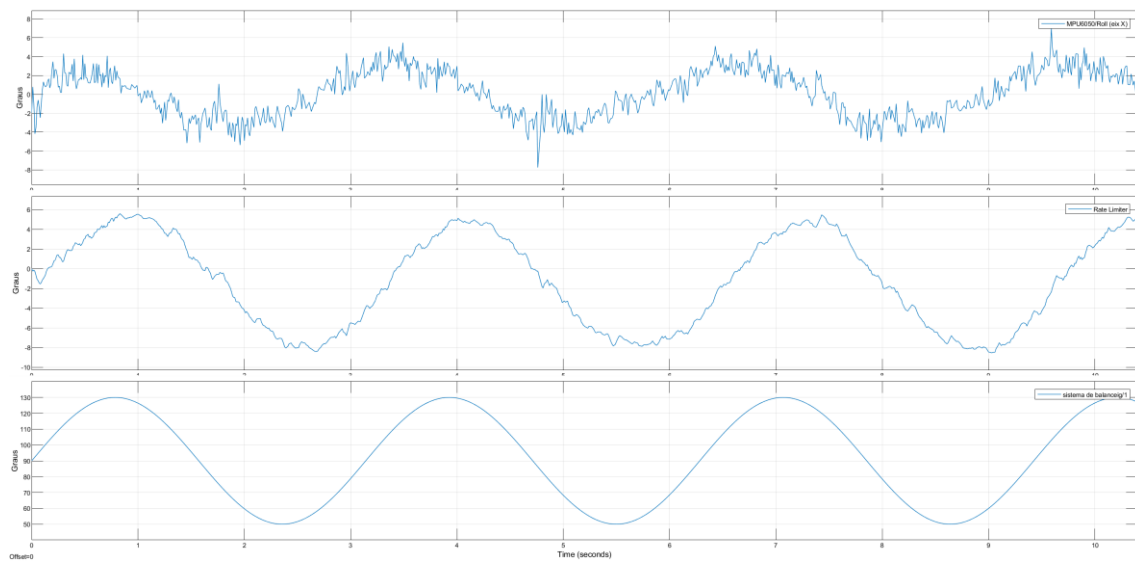


Figura 105. Prova 1, servomotor a 40 graus

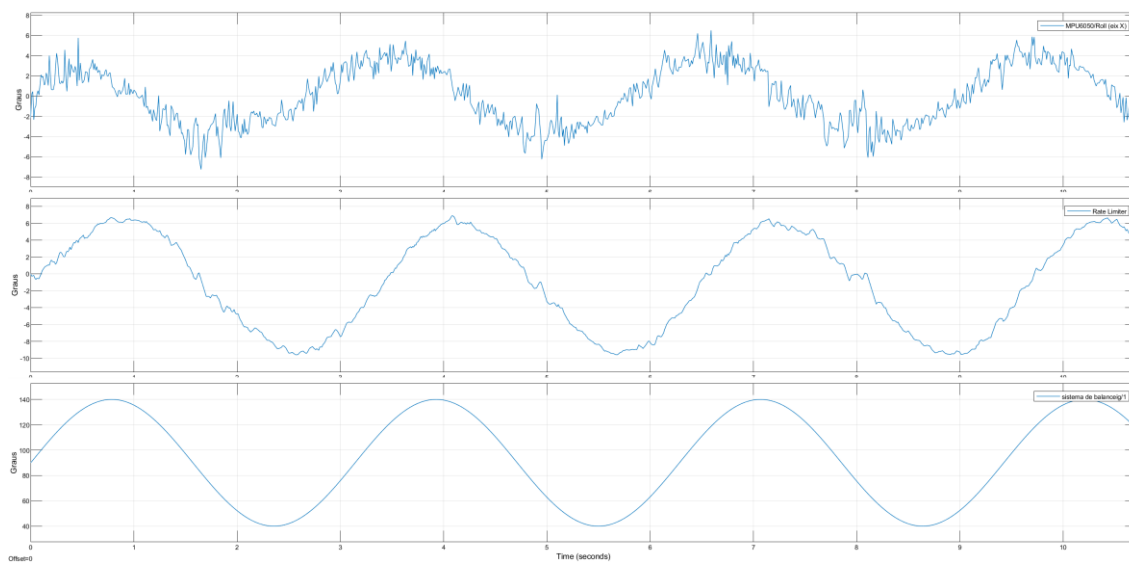


Figura 106. Prova 1, servomotor a 50 graus

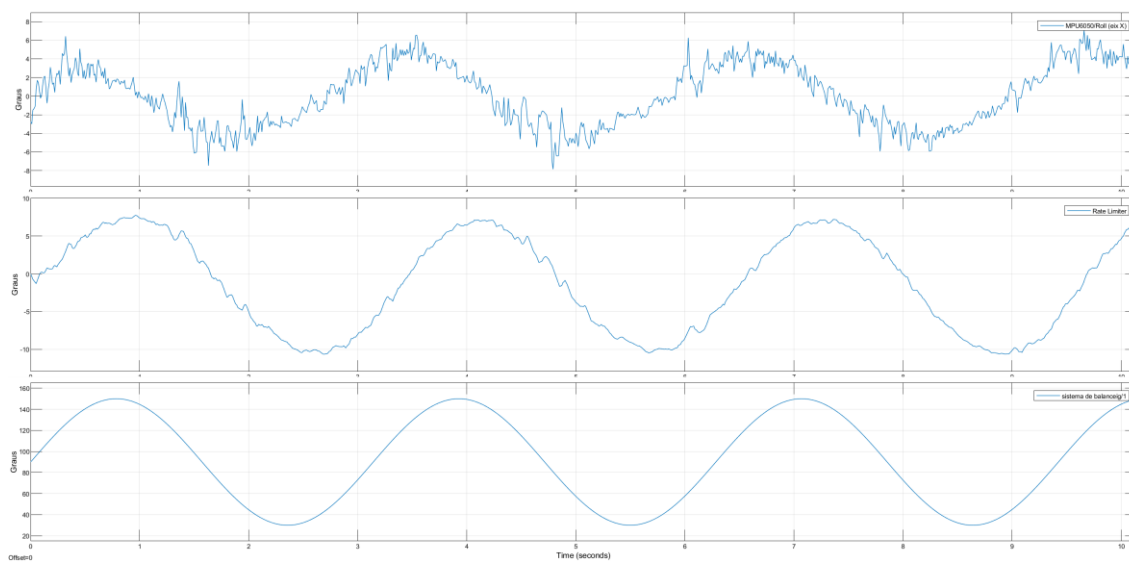


Figura 107. Prova 1, servomotor a 60 graus

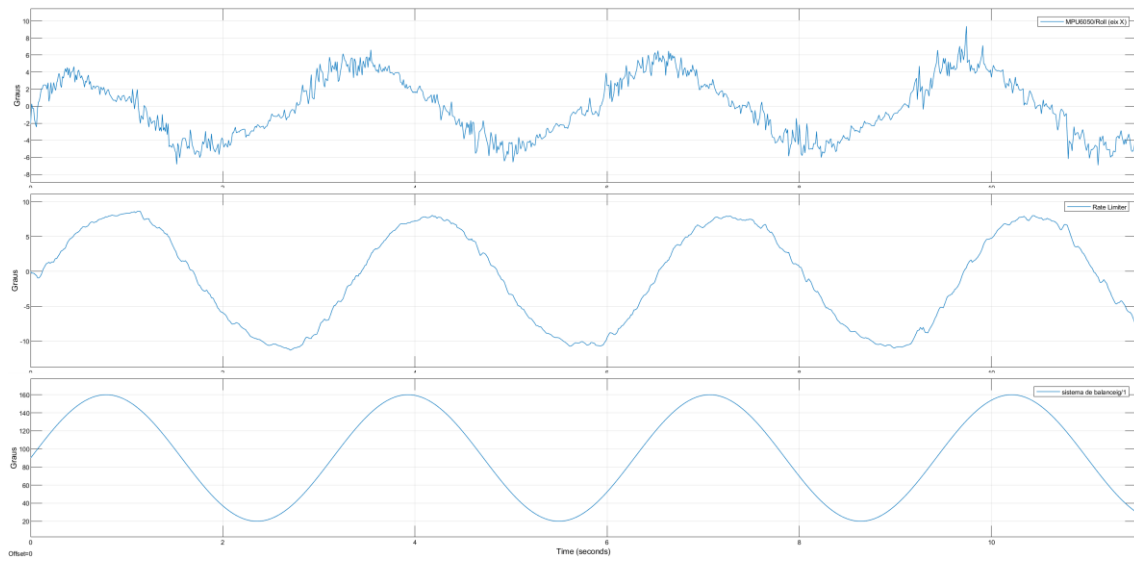


Figura 108. Prova 1, servomotor a 70 graus

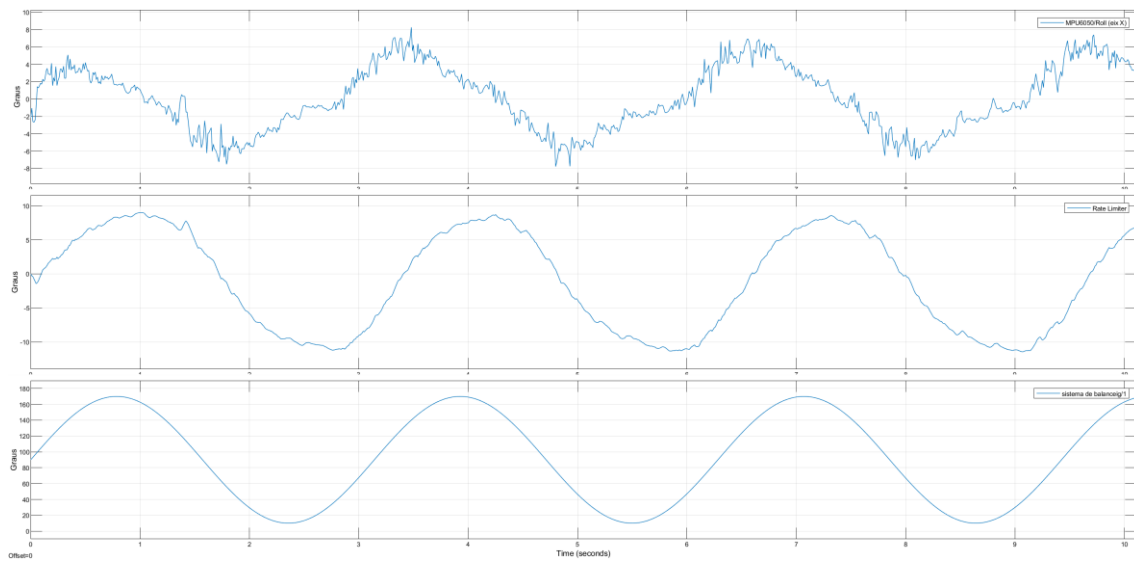


Figura 109. Prova 1, servomotor a 80 graus

9.3.2 Resultat prova 2 Sistema Digital

En aquest apartat veurem els resultats de la prova 2 realitzats amb el model digital.

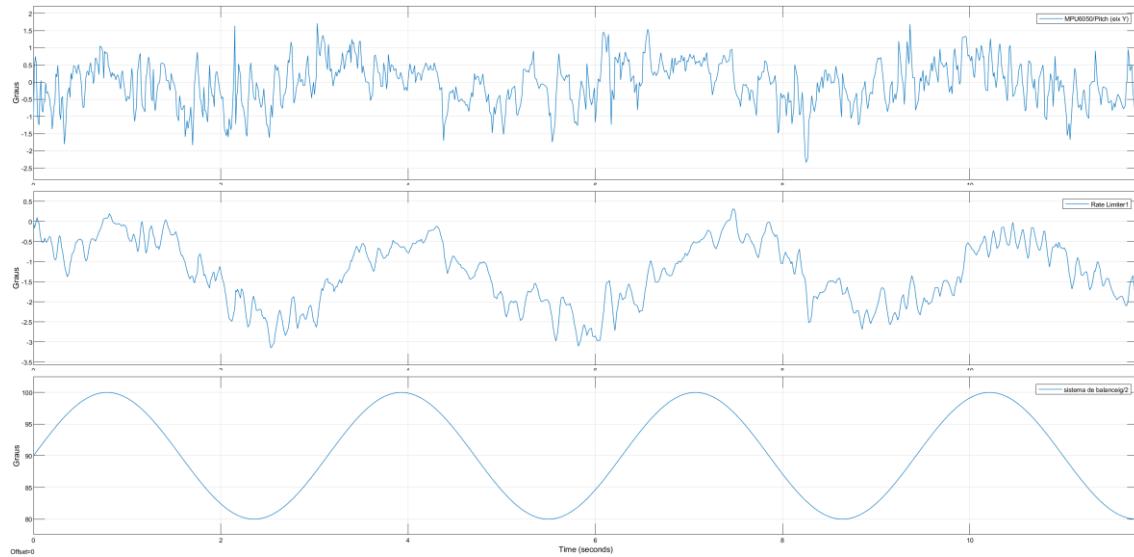


Figura 110. Prova 2, servomotor a 10 graus

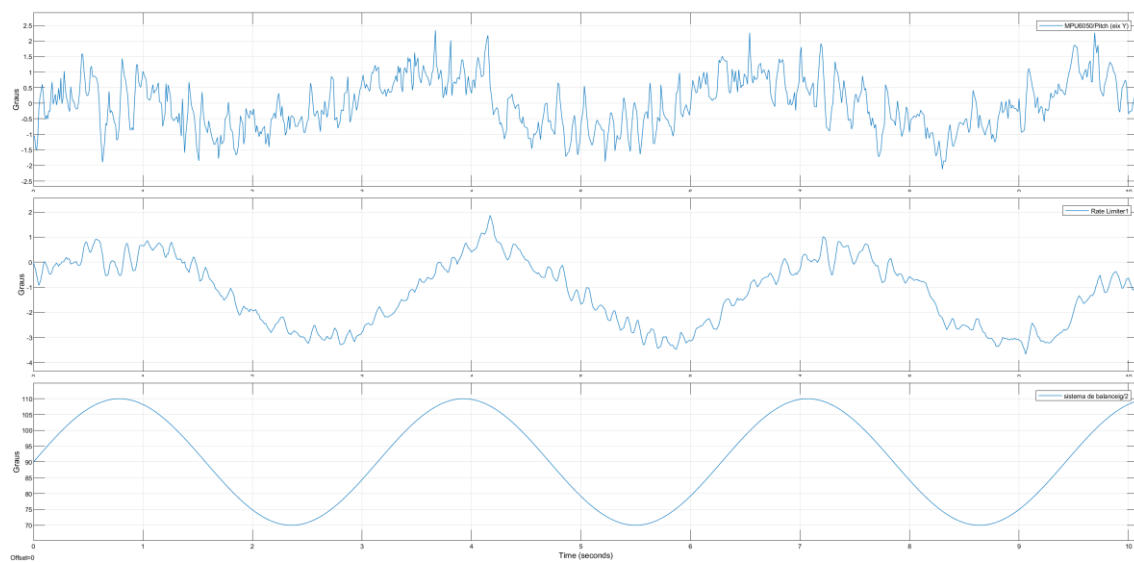


Figura 111. Prova 2, servomotor a 20 graus

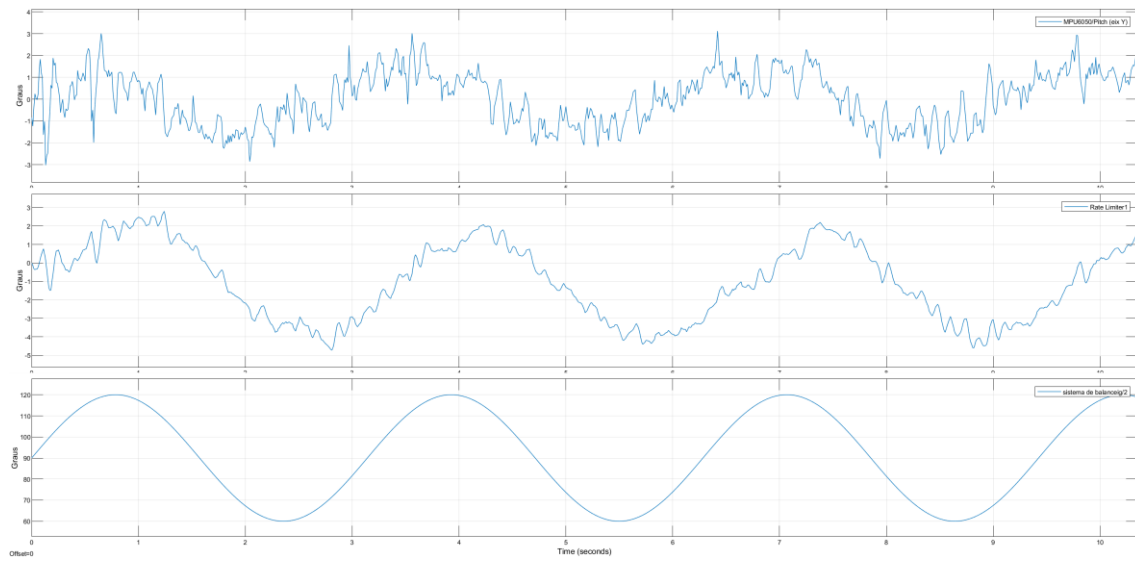


Figura 112. Prova 2, servomotor a 30 graus

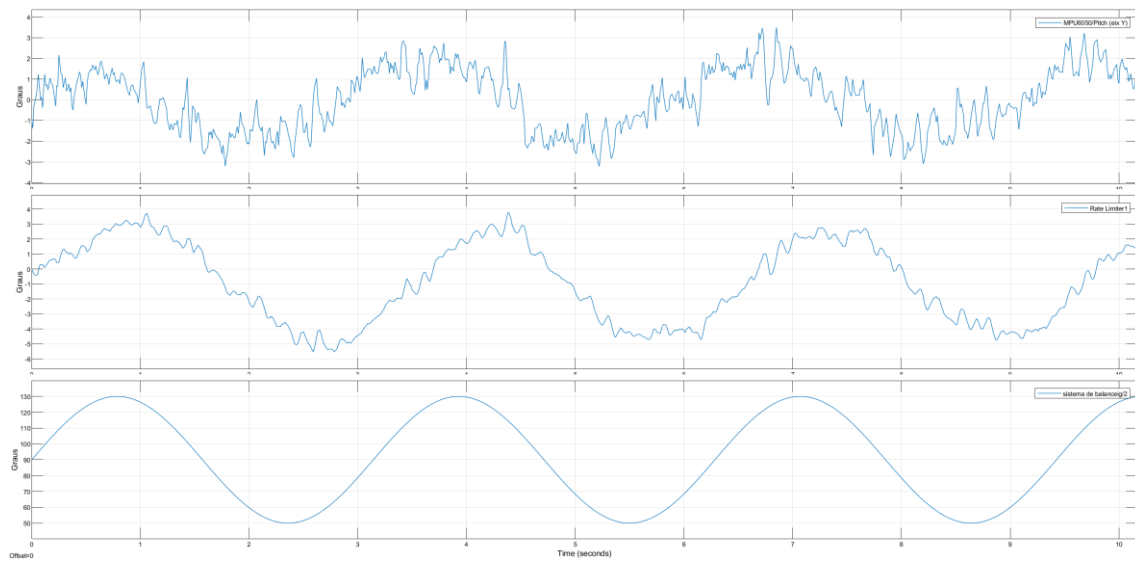


Figura 113. Prova 2, servomotor a 40 graus

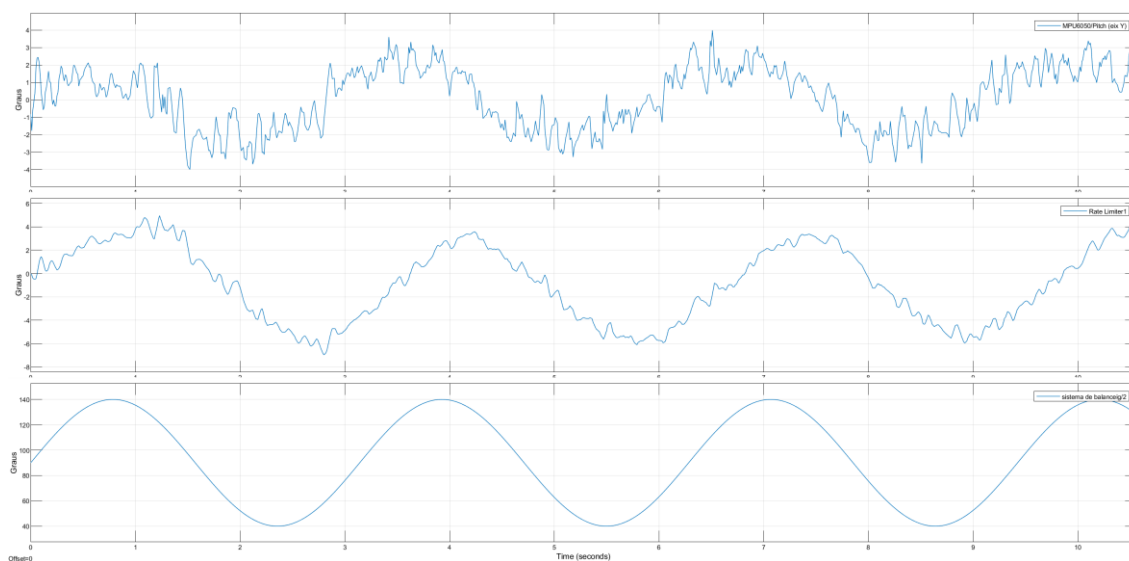


Figura 114. Prova 2, servomotor a 50 graus

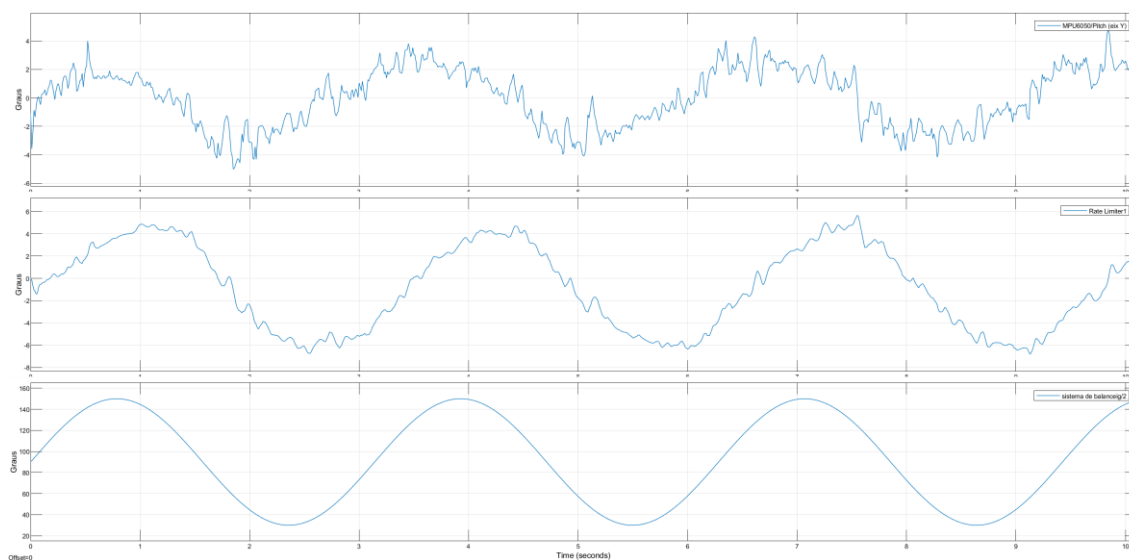


Figura 115. Prova 2, servomotor a 60 graus

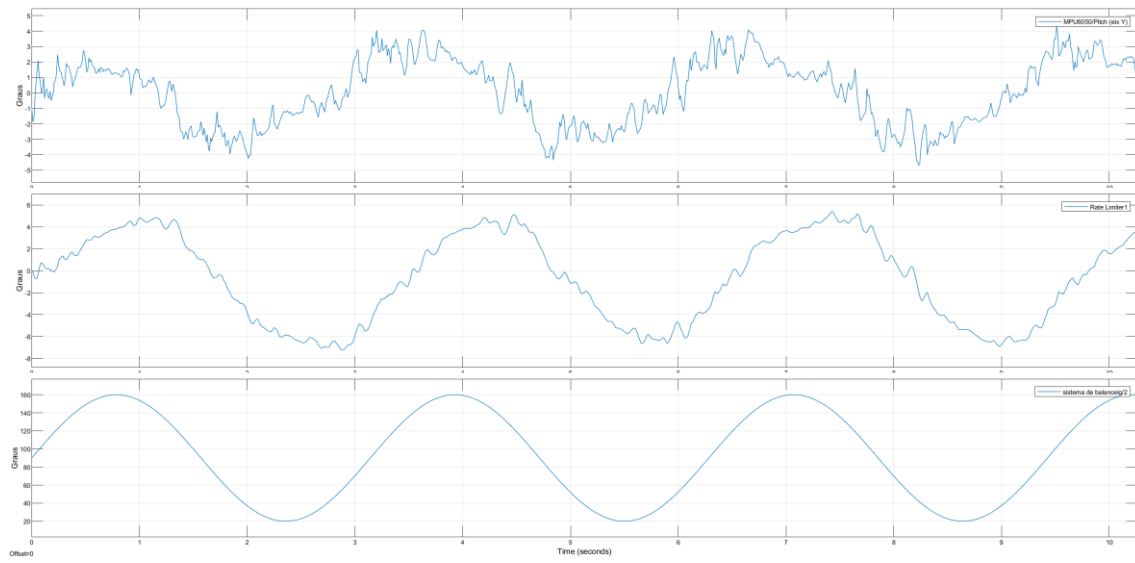


Figura 116. Prova 2, servomotor a 70 graus

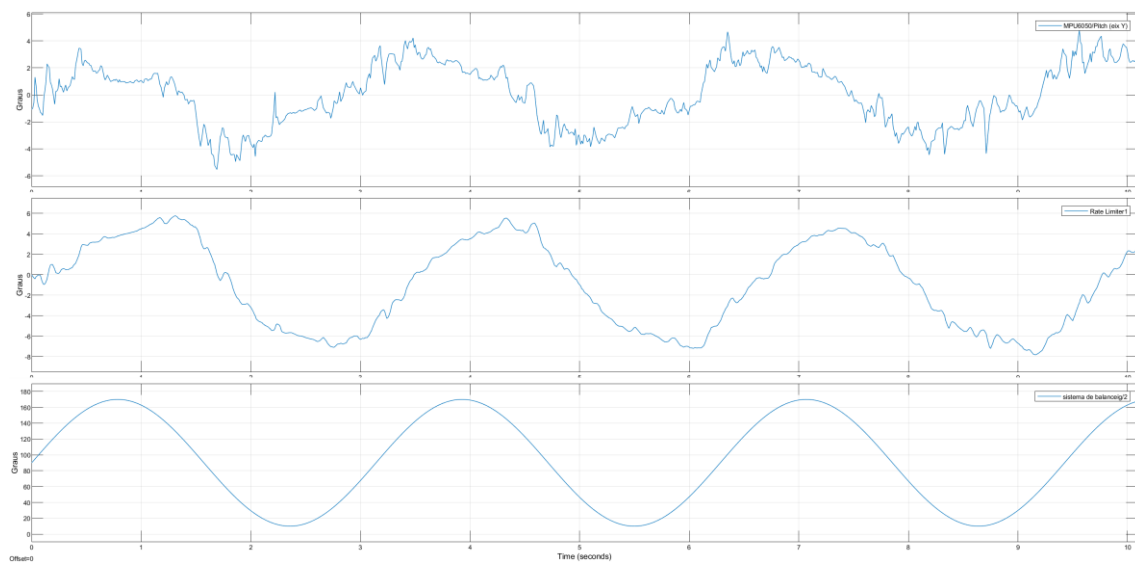


Figura 117. Prova 2, servomotor a 80 graus

8.3.3 Resultat prova 3 Sistema Digital

Per acabar, en aquest apartat veurem els resultats de la prova 3 realitzats amb el model digital, per aquesta prova les pertorbacions són les següents:

Grau de llibertat	Angle del servo	Freqüència rad/sec
<i>Roll</i>	50	2
<i>Pitch</i>	60	1

Taula 23. Paràmetres de pertorbació de la prova 3 per el sistema digital

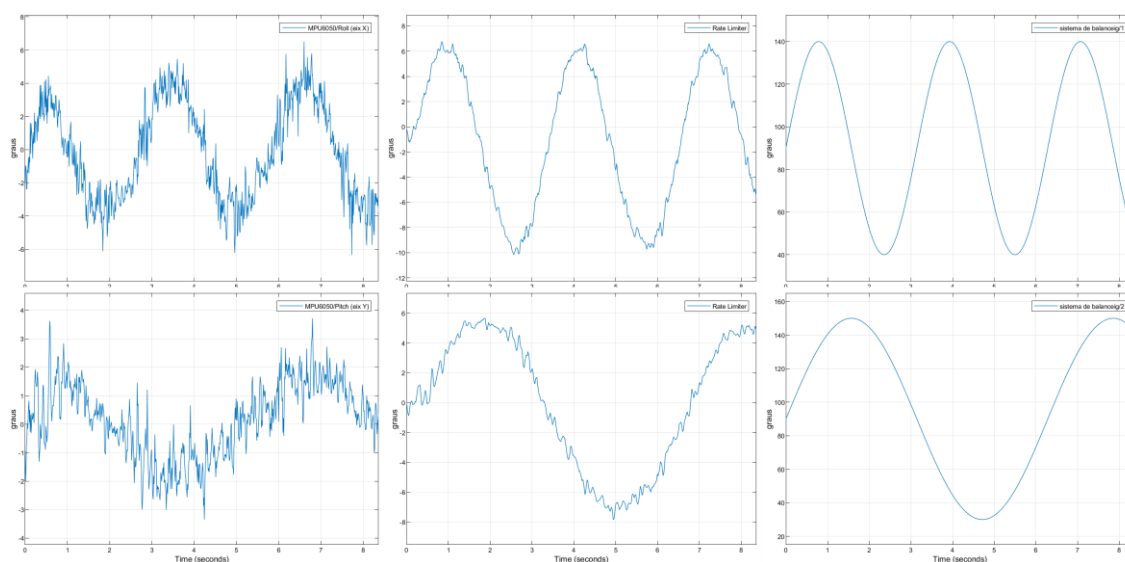


Figura 118. Prova 3, servomotor de *roll* a 50 graus i de *pitch* a 60

8.3.4 Valoració dels resultats sistema digital

Veient els resultats obtinguts amb el model digital, podem realitzar una sèrie de valoracions per tal de poder dictaminar en les conclusions, si aquests han sigut positius o no tenint en compte les característiques del model.

- En primer lloc podem observar que tenim una banda de morta d'aproximadament 8 graus, afegir també que aquesta banda morta és veu incrementada en funció que augmenta la pertorbació.
- En segon lloc podem observar que hi ha acoblament amb la pertorbació, és a dir, que observem els límits de la banda morta en els pics i les panxes que realitza la ona de pertorbació.

Observem un arrissat constant en tota la senyal degut als materials i components de construcció del model que atribuïm a la fricció seca.

- Podem observar que tenim un millor comportament en el cas del *roll* que en el *pitch*, ja que podem veure com hi ha bastant menys soroll en el *roll*.

8.3.5 Resultat prova 1 Sistema Analògic

En aquest apartat veurem el resultat de la prova 1 realitzada al model analògic, per realitzar la lectura dels angles, s'ha instal·lat el sensor MPU6050 a l'interior del model per tal de poder-ne enregistrar els valors per un posterior anàlisi.

Per poder fer les proves s'ha requerit que aproximadament cada 2 minuts és tornes a impulsar els giroscopis amb els motors DC.

En les figures que és mostren al llarg de les proves del model analògic hi trobarem 2 gràfiques, que representen el següent:

- Gràfica superior, mostra l'angle real en el que es troba el model per tal de poder saber en tot moment el comportament real de sistema d'estabilització.
- Gràfica inferior, mostra la posició del servo de la plataforma en angles per tal de saber en quina posició es troba en cada moment i poder valorar els resultats.

Exceptuant la gràfica de la prova 3, que ens representa el següent:

- Gràfica superior, mostra l'angle real en el que es troba el model per tal de poder saber en tot moment el comportament real de sistema d'estabilització.
- Gràfica del mig, mostra la posició de *roll* del servo.
- Gràfica inferior, mostra la posició de *pitch* del servo.

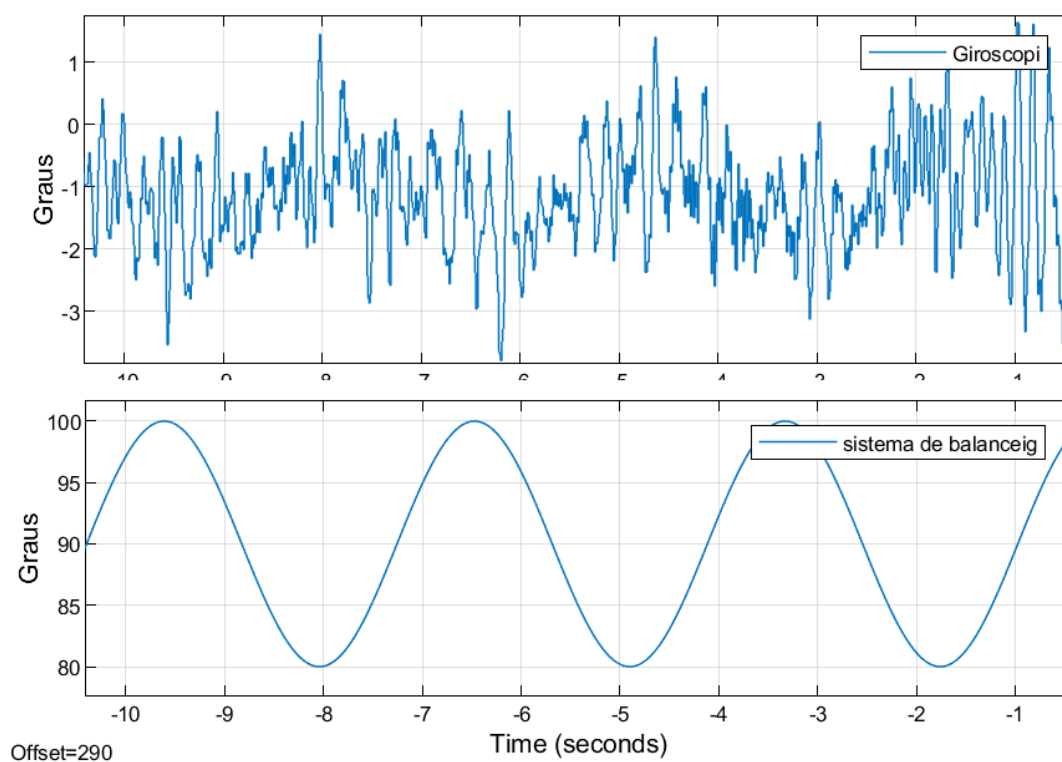


Figura 119. Prova 1, servomotor a 10 graus

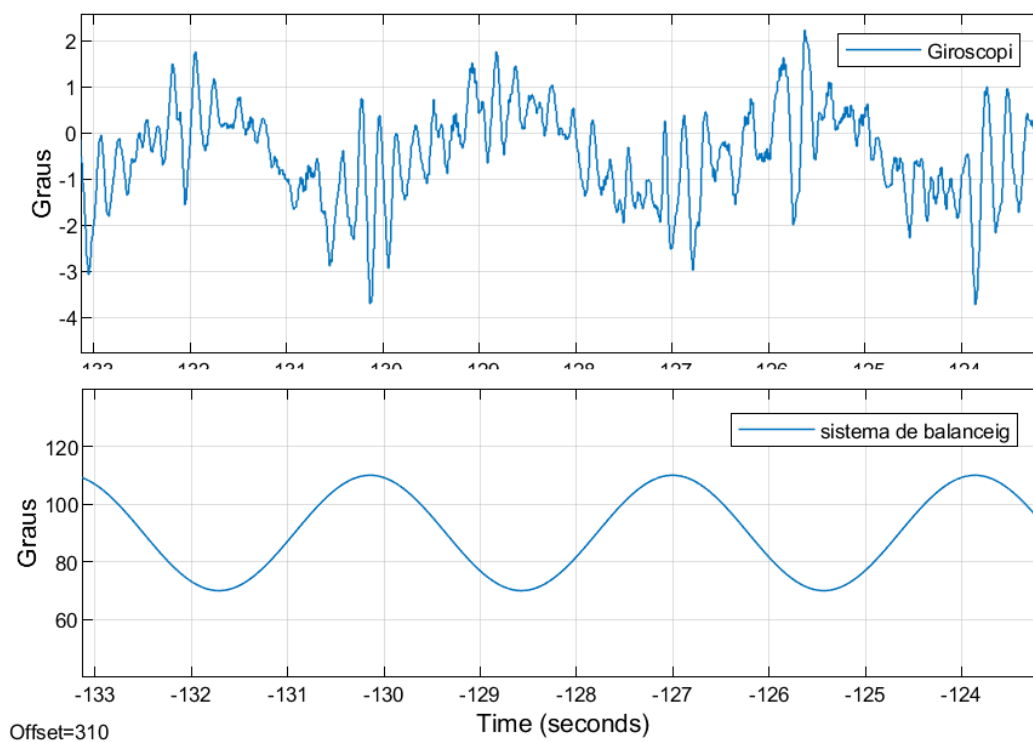


Figura 120. Prova 1, servomotor a 20 graus

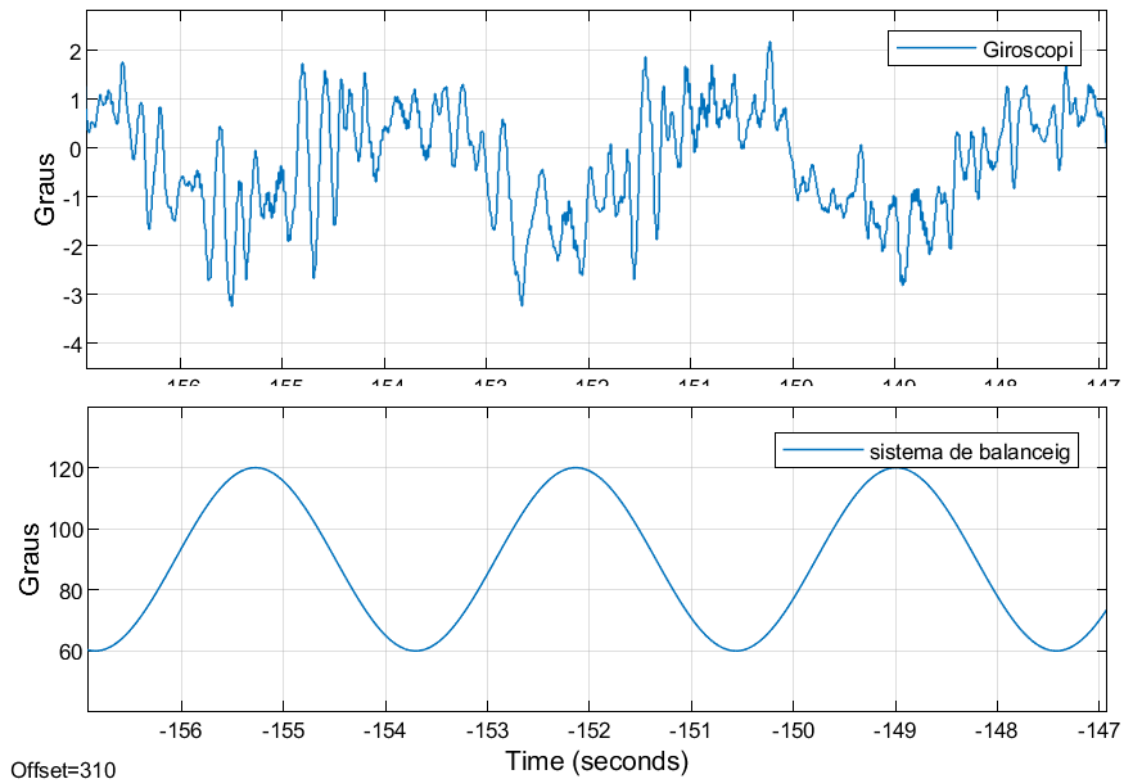


Figura 121. Prova 1, servomotor a 30 graus

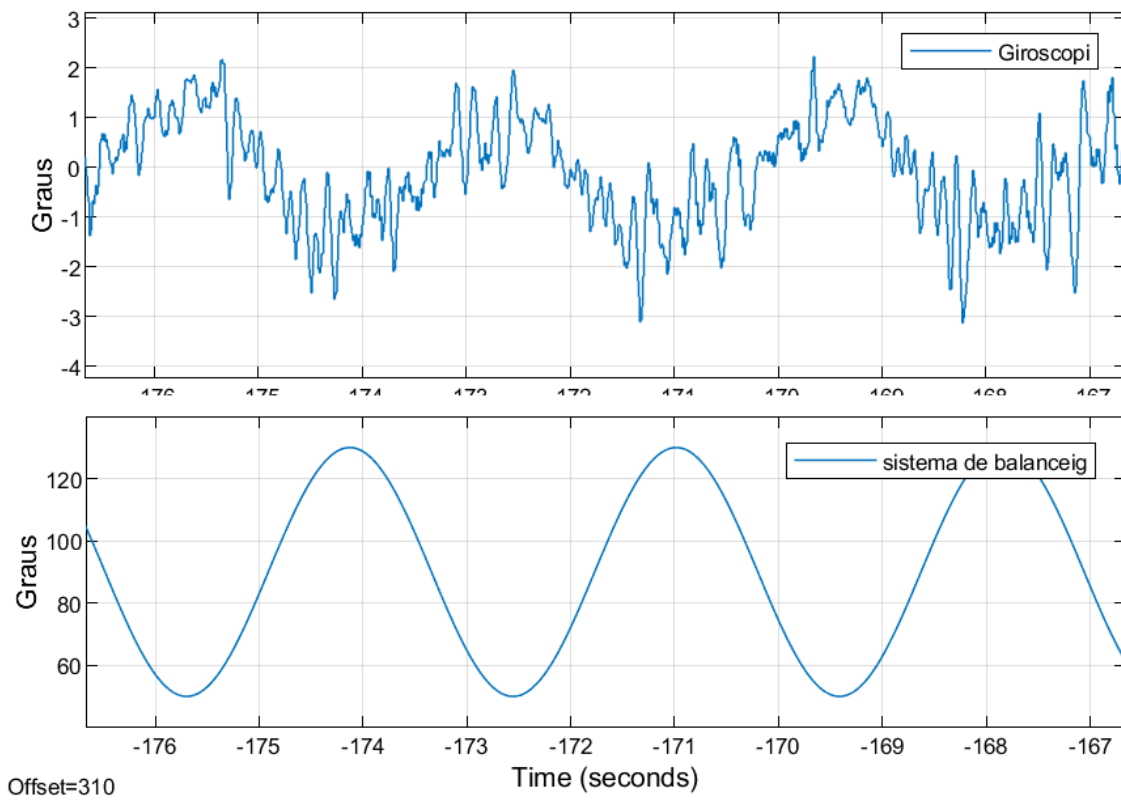


Figura 122. Prova 1, servomotor a 40 graus

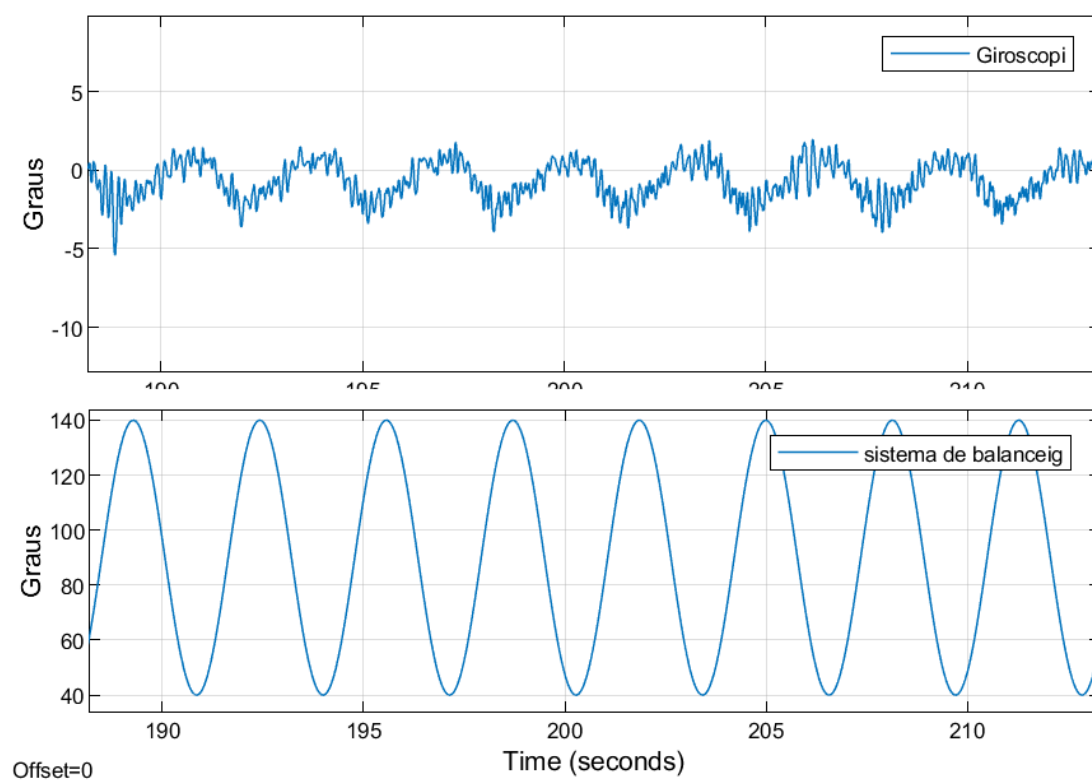


Figura 123. Prova 1, servomotor a 50 graus

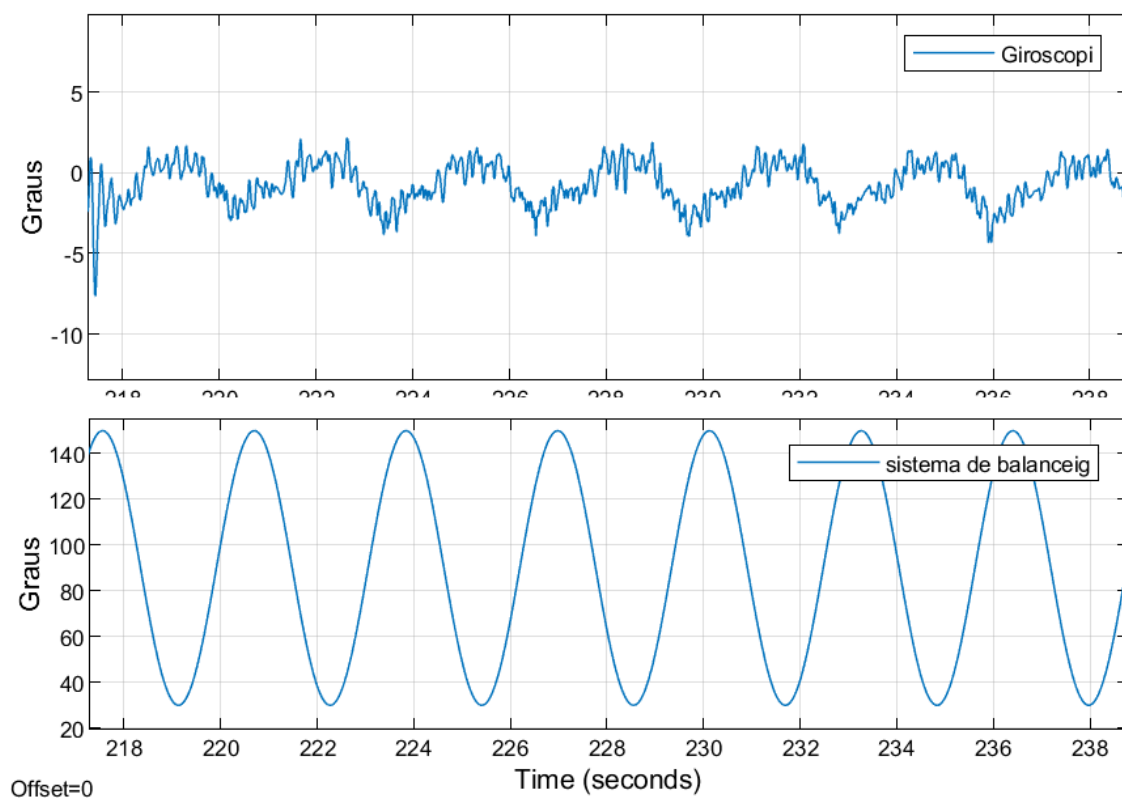


Figura 124. Prova 1, servomotor a 60 graus

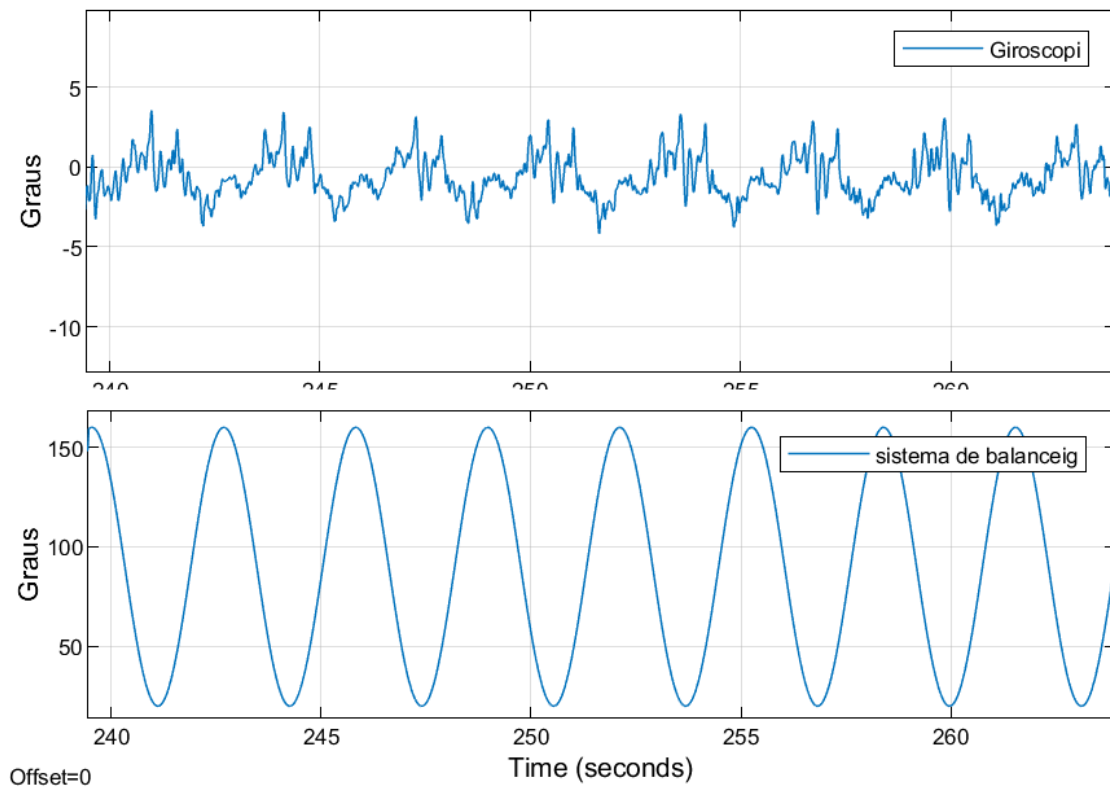


Figura 125. Prova 1, servomotor a 70 graus

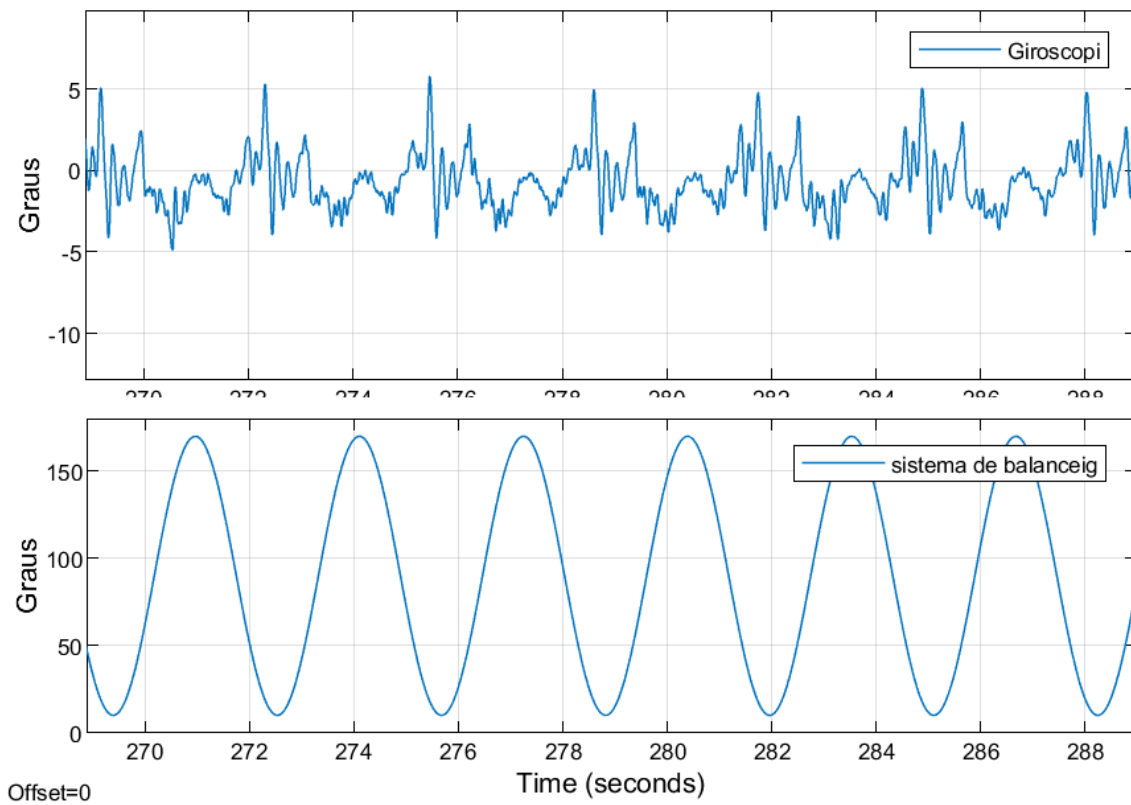


Figura 126. Prova 1, servomotor a 80 graus

8.3.6 Resultat prova 2 Sistema Analògic

En aquest apartat veurem els resultats de prova 2, és a dir, l'angle de *pitch* quan estem movent el servo de roll.

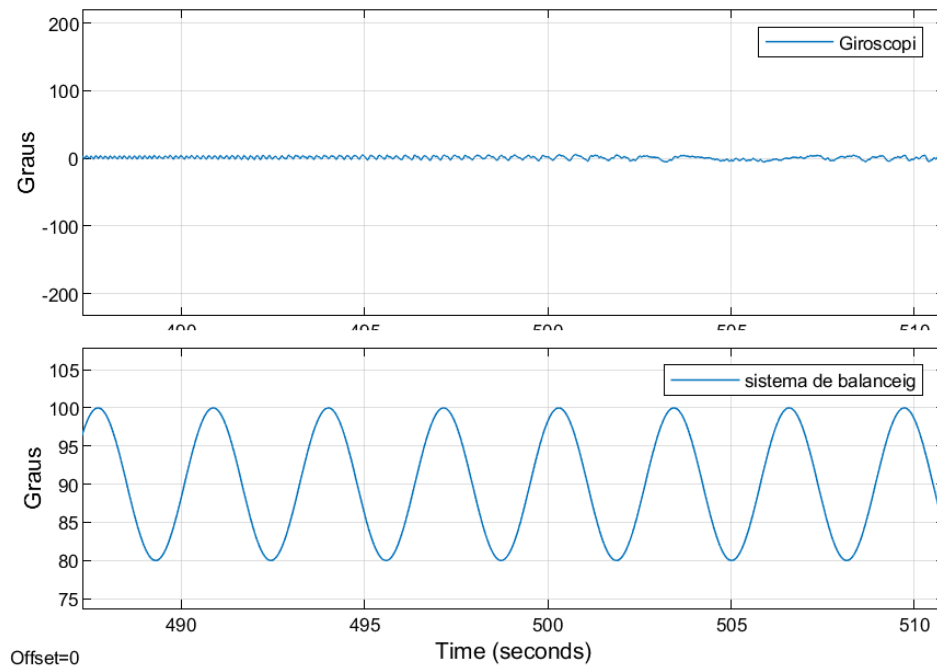


Figura 127. Prova 2, servomotor a 10 graus

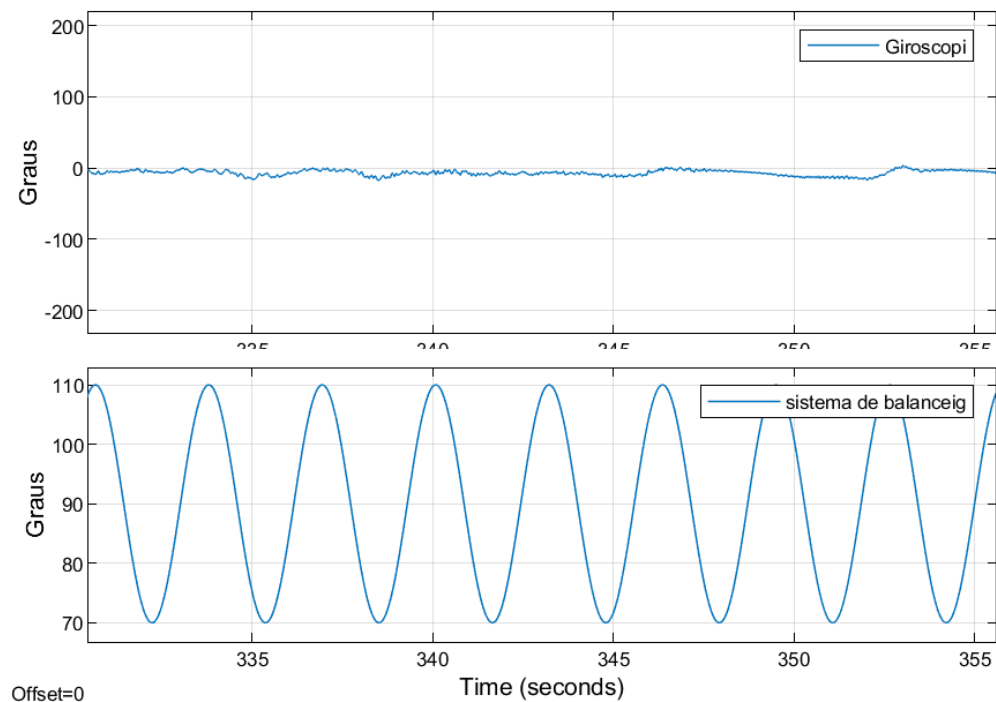


Figura 128. Prova 2, servomotor a 20 graus

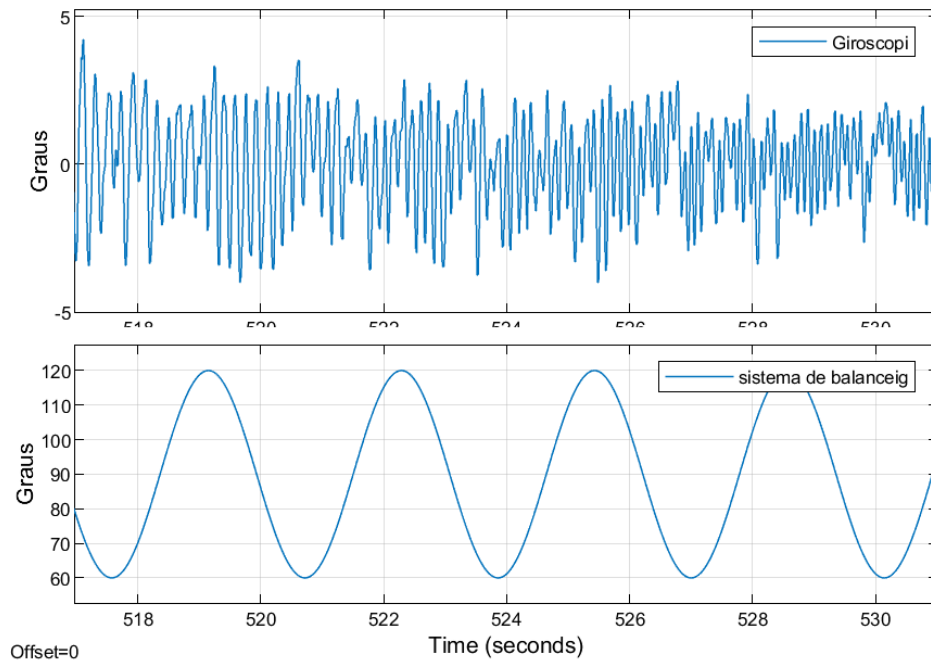


Figura 129. Prova 2, servomotor a 30 graus

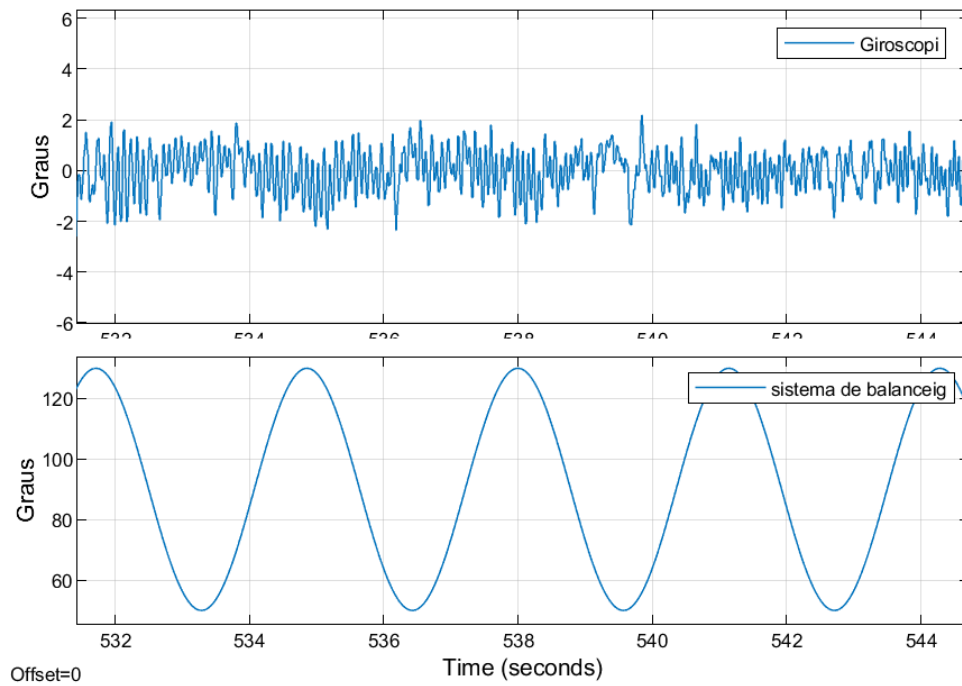


Figura 130. Prova 2, servomotor a 40 graus

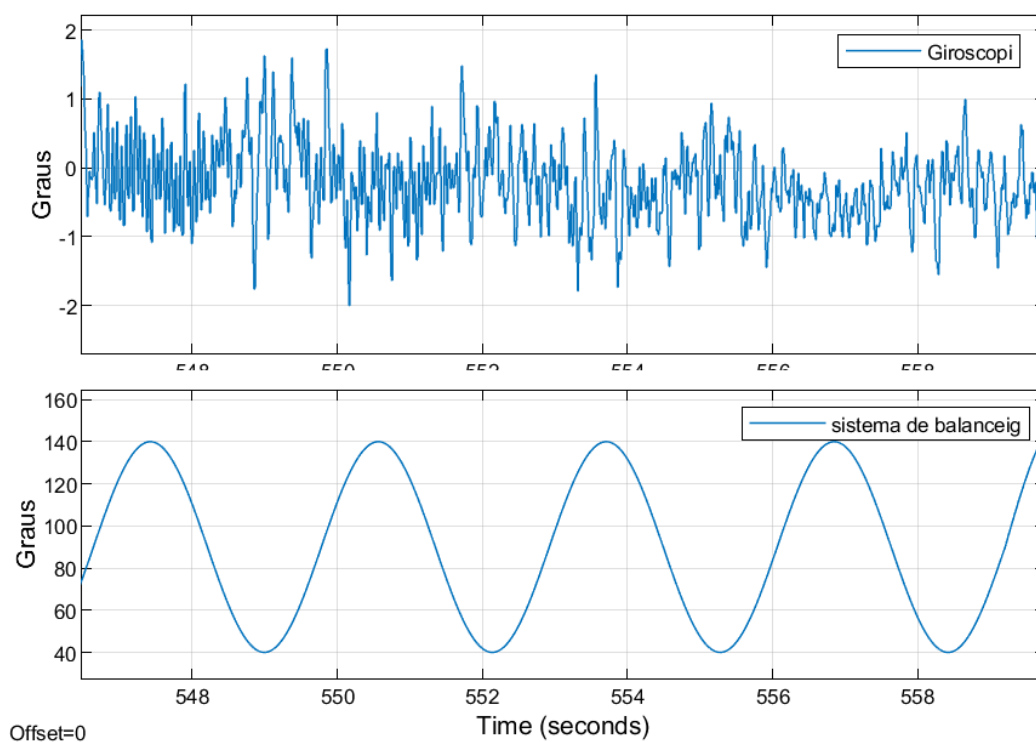


Figura 131. Prova 2, servomotor a 50 graus

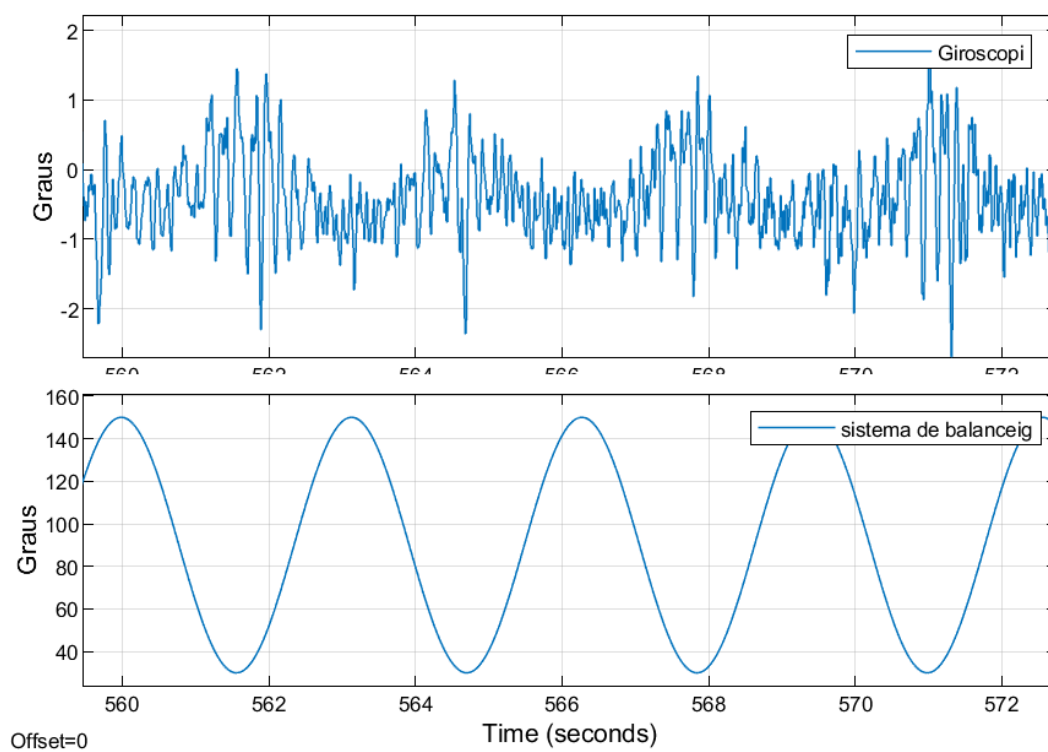


Figura 132. Prova 2, servomotor a 60 graus

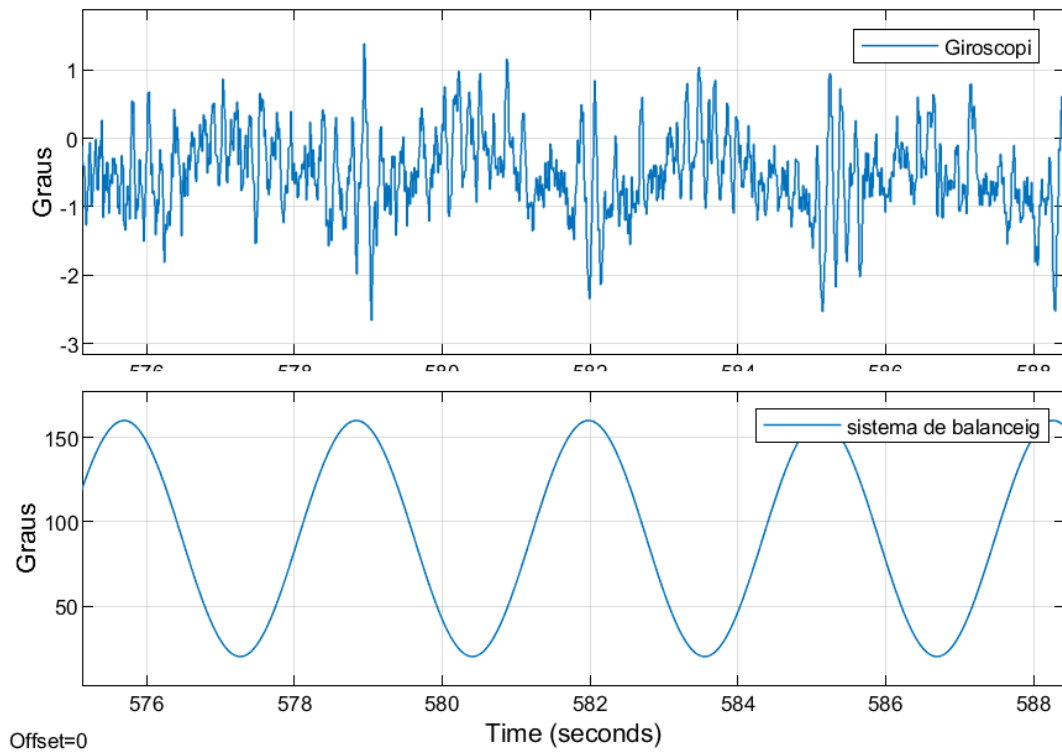


Figura 133. Prova 2, servomotor a 70 graus

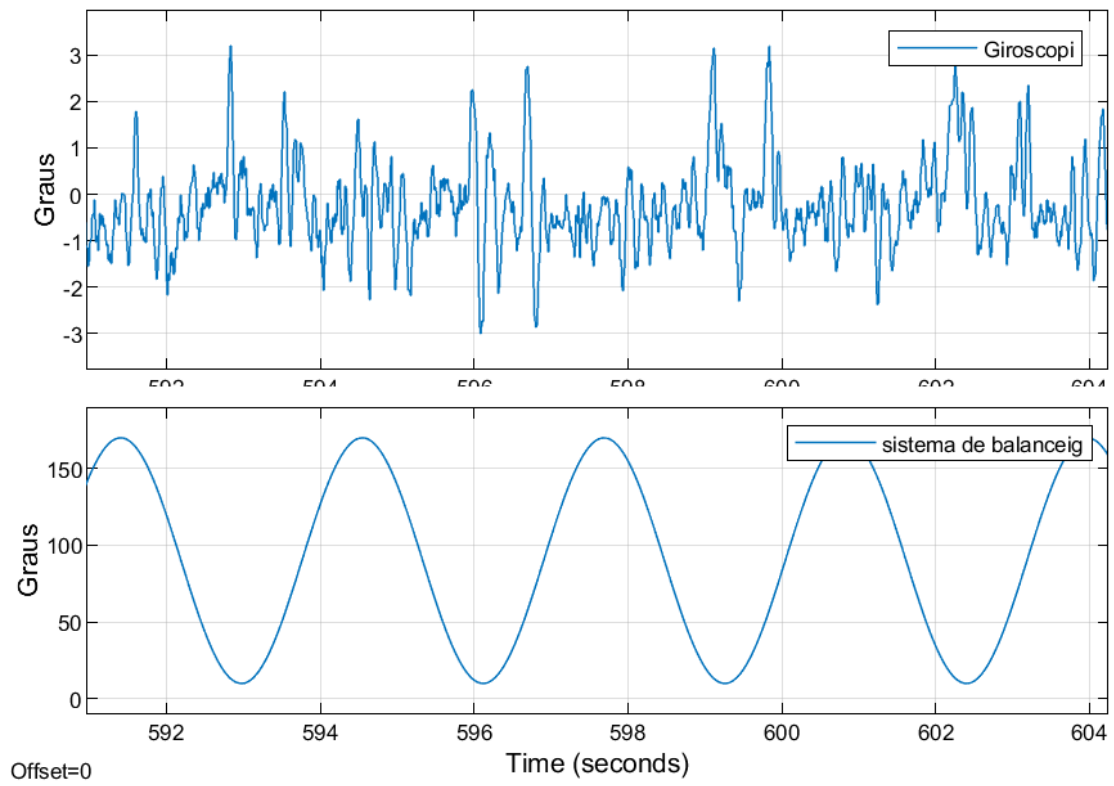


Figura 134. Prova 2, servomotor a 80 graus

8.3.7 Resultat prova 3 Sistema Analògic

En aquest apartat veurem els resultats de la prova 3 realitzats amb el model digital, per aquesta prova les pertorbacions, al igual que en model digital, són les següents:

Grau de llibertat	Angle del servo	Freqüència rad/sec
<i>Roll</i>	50	2
<i>Pitch</i>	60	1

Taula 24. Paràmetres de pertorbació de la prova 3 per el sistema digital

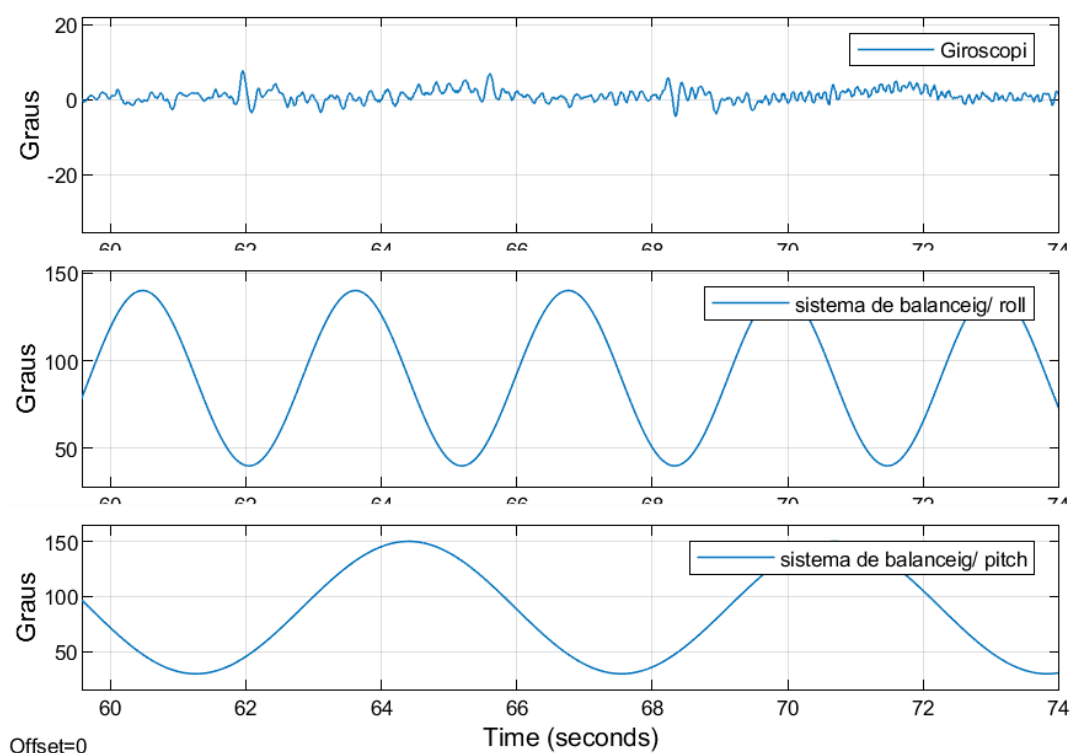


Figura 135. Prova 3, servomotor de *roll* a 50 graus i de *pitch* a 60

8.3.8 Valoració dels resultats sistema analògic

Els resultats obtinguts amb el model analògic, ens permeten realitzar una sèrie de valoracions per tal de poder dictaminar en les conclusions, si aquests han sigut positius o no tenint en compte les característiques del model.

- En primer lloc podem observar que tenim una banda de morta d'aproximadament 1 grau sense contar amb el soroll derivat de la vibració dels giroscopis mecànics.
- En segon lloc podem observar que hi ha acoblament amb la pertorbació, és a dir, que observem els límits de la banda morta en els pics i les panxes que realitza la ona de pertorbació.
- En tercer lloc podem concloure que compleix amb l'especificació referent al temps de resposta, ja que podem observar un comportament instantani.

Com a conclusió de les proves, en podem dir que els resultats tant de comportament i disseny han sigut més satisfactoris amb el model analògic.

Capítol 9. Pressupost

En aquest apartat veurem el pressupost plantejat inicialment per poder-lo contrastar amb el cost final dels materials empleats en aquest projecte, per tal de poder valorar si s'ha fet una bona planificació de costos prèvia al projecte.

9.1 Pressupost inicial

Així doncs en aquest punt veurem el pressupost inicial del projecte, per tal de posteriorment poder-lo comprar amb el cost final de projecte.

9.1.1 Model Analògic

Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	1	12,60 euros	12,60 euros
Giroscopi mecànic	2	102,67 euros	205,34 euros
Rodaments	1 (20 peces)	9,99 euros	9,99 euros
			227,93 euros

Taula 25. Pressupost inicial del model analògic

9.1.2 Model Digital

Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	1	12,60 euros	12,60 euros
IMU MPU 6050	1 (3 peces)	7,99 euros	7,99 euros
Servo motor MG 996R	2	13,90 euros	13,90 euros
Arduino MEGA 2560	1	40,90 euros	40,90 euros
Rodaments	1 (20 peces)	9,99 euros	9,99 euros
			85,38 euros

Taula 26. Pressupost inicial del model digital

9.1.3 Pressupost inicial total

Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	3	12,60 euros	37,80 euros
IMU MPU 6050	1 (3 peces)	7,99 euros	7,99 euros
Servo motor MG 996R	4	13,90 euros	27,80 euros
Giroscopi Mecànic	2	102,67 euros	205,34 euros
Rodaments	1 (20 peces)	9,99 euros	9,99 euros
Arduino MEGA 2560	1	40,90 euros	40,90 euros
			329,82 euros

Taula 27. Pressupost inicial total

9.2 Pressupost final

En aquest darrer punt veurem el cost final de projecte incloent els materials i eines utilitzades que en no s'havien pressupostat en el pressupost inicial.

9.2.1 Model Analògic

Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	1	12,60 euros	12,60 euros
Giroscopi mecànic	2	102,67 euros	205,34 euros
Rodaments	1 (20 peces)	9,99 euros	9,99 euros
			227,93 euros

Taula 28. Pressupost final del model analògic

9.2.2 Model Digital

Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	2	12,60 euros	25,20 euros
IMU MPU 6050	1 (3 peces)	7,99 euros	7,99 euros
Servo motor MG 996R	2	13,90 euros	13,90 euros
Arduino MEGA (ELEGOO)	1	13,99 euros	13,99 euros
Rodaments	1 (20 peces)	9,99 euros	9,99 euros
			71,07 euros

Taula 29. Pressupost final del model digital

9.2.3 Materials i eines adquirits per aquest projecte

En aquest punt només hi constaran els materials i eines que han sigut adquirits expressament per aquest projecte, de forma que no hi constaran les eines que han sigut cedides o que ja en disponia.

Estri	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Cablejat Dunpont wire	1	6,99 euros	6,99 euros
Super glue pincel	6	2,04 euros	12,24 euros
Spray de pintura negra	2	2 euros	4 euros
Spray de pintura blanca	4	2 euros	8 euros

Taula 30. Cost de les eines del projecte

9.2.4 Pressupost final total

Materials			
Material	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Planxa de contraxapat	3	12,60 euros	37,80 euros
IMU MPU 6050	1 (3 peces)	7,99 euros	7,99 euros
Servo motor MG 996R	4	13,90 euros	27,80 euros
Giroscopi Mecànic	2	102,67 euros	205,34 euros
Rodaments	2 (20 peces)	9,99 euros	19,98 euros
Arduino MEGA (ELEGOO)	1	13,99 euros	13,99 euros
			312,90 euros

Taula 31. Cost final dels elements del projecte

Estris			
Estri	Quantitat	Cost unitari	Cost total
Cablejat de senyal	1	6,99 euros	6,99 euros
Super glue pincel	6	2,04 euros	12,24 euros
Spray de pintura negra	2	2 euros	4 euros
Spray de pintura blanca	4	2 euros	8 euros
			31,23 euros

Taula 32. Cost final dels estris empleats per el projecte

9.2.5 Valoració de costos

Un cop vistos els pressupost inicial i el cost final del projecte podem fer una valoració de la planificació pecuniària del projecte, així com també una primera valoració dels costos de cada un dels models.

Podem veure que el pressupost inicial ens plantejava un cost de 329,82 euros, només de materials de construcció, mentre que el cost real ha sigut de 312,90 euros. Podem observar una disminució del cost tot i que s'han adquirit materials de més com:

- Una planxa de contraxapat
- 20 rodament extrems

No obstant, ha sigut possible disminuir el cost final, perquè s'han utilitzat plaques microcontroladors de la marca ELEGOO, ja que Arduino és una marca de codi obert que es poden adquirir plaques amb les mateixes característiques a un preu més ajustat.

Com a resultat del cost final es pot obtenir una valoració positiva dels costos d'aquest projecte. En afegit a això, podem observar la diferència de costos de cadascun dels models (veure les taules Taula 25, Taula 26, Taula 28 i Taula 29). El model digital té un cost de pressupost inicial de 227'30 euros que correspon amb el pressupost final. D'altra banda el model mecànic té un pressupost inicial de 85'38 euros i un pressupost final de 71,07 euros. D'aquí en podem extreure que el model digital és una alternativa molt més econòmica.

Capítol 10. Conclusions i línies futures

En aquest projecte s'han dissenyat i construït 2 models per simular el comportament d'un compartiment dins d'un vaixell amb l'objectiu de fer estudis de compensació dels moviments de capcineig (*roll*) i balanceig (*pitch*). Ambdós s'han dissenyat i construït amb les mateixes dimensions (20x20x20 cm) i de contra xapat amb un espessor de 4 mm. Un model conté una instrumentació analògica (giroscopis analògics) i l'altre una de digital (servomotor, Arduino, IMU MPU6050, Simulink).

Aquests models han permès estudiar i comparar el comportament de cadascuna de les instrumentacions pel que fa a la compensació del *roll* i el *pitch*. Tenint en compte que en tots dos sistemes ha sigut possible recuperar l'estabilitat dels models quan han sigut sotmesos a cadascuna de les proves, les conclusions que en podem extreure són les següents.

Conclusions del model analògic

Després de realitzar l'estudi i les proves al model analògic podem concloure, començant des del punt de vista del disseny estructural del sistema, que és un sistema bastant senzill d'implementar ja que gràcies a l'efecte giroscòpic, podem ubicar els giroscopis en quasi qualsevol lloc de la cabina. Per altra banda la seva instal·lació només requereix d'uns suports que permetin la rotació del giroscopi.

En vista dels resultats a les proves, podem dir que ha complert amb els objectius que s'havien plantejat amb una resposta pràcticament instantània. Observem que té una banda de morta d'aproximadament 1 grau, és a dir, 0,5 graus per banda en els dos eixos, tant de *roll* com de *pitch*. Aquesta banda morta es manté durant tot el seu rang operacional.

Tanmateix és necessari afegir el fet que el model construït en aquest projecte, requereix que aproximadament cada 2 minuts es torni a impulsar els giroscopis amb els motors DC. Aquest problema es solucionaria connectant els motors DC als giroscopi, però no s'ha realitzat en aquest projecte ja que comportaria redissenyar l'estructura per tal de permetre el moviment de tot el conjunt, giroscopi més motor

Finalment el cost total d'aquest model ha sigut de 227,30 euros, dividit en 2 giroscopis analògics, rodaments i les planxes de contra xapat.

Conclusions del model digital

Les conclusions que podem extreure del model digital són les següents. Començant des del punt de vista de la construcció podem dir que és un model bastant senzill ja que tant sols requereix la instal·lació de 2 servomotors i una unitat IMU MPU 6050. L'inconvenient però, són els cables connectors que s'han de deixar una mica llargs per tal de poder permetre els moviments de la capsa. Aquest és un model que requereix estar sempre connectat a un ordinador o terminal que permeti fer una lectura de la senyal per tal de poder veure els resultats i poder enviar ordres al sistema en cas de necessitar algun ajustament.

Des del punt de vista del disseny de control podem dir que ha sigut un model molt enriquidor perquè ens ha permès dur a terme un projecte de control des dels inicis, passant per les diferents fases que comporta dissenyar un controlador des del començament, al mateix temps ha sigut un disseny bastant complicat de dur a terme en comparació al disseny analògic.

Quan parlem de resultats, podem observar que té un temps de resposta d'uns 2,4 segons sumats a una banda morta amb un arc de 8 graus. Això pot plantejar alguns problemes ja que per a petites escores aquest model té poca sensibilitat. Observem també que hi ha un soroll constant en tota la lectura, fruit de la fricció seca derivada dels materials i components que el configuren. D'altra banda podem veure com el comportament en l'eix de *roll* és millor que amb l'eix de *pitch* ja que hi observem menys soroll que en el de *pitch*.

El cost total d'aquest model ha estat de 71,07 euros, un cost molt menor al del model analògic tot i compta amb més elements.

Valoracions final, depèn del criteri

La valoració final d'aquest projecte que respon a la pregunta inicial "quin giroscopi és més adient per estabilitzar una embarcació en l'aplicació en l'àmbit marí, si el giroscopi digital o el giroscopi l'analogic" la farem tenint en compte els objectius que hem plantejat al principi del projecte, que recordem són:

- 1: Capacitat de compensació en els dos graus de llibertat, és a dir, que compensin escores i trimat del vaixell de manera indiferent.

- 2: Temps d'establiment a 4 segons, no hi posem un temps inferior ja que les pertorbacions que intentem emular són les ones del mar per a grans embarcacions.
- 3: Assolir un mínim de correcció de 20 graus per a cada banda dels graus de llibertat.
- 4: Error nul en règim permanent, és a dir, com a resposta a la pertorbació el sistema ha de recuperar 0 graus de *roll* i 0 graus de *pitch*.

En base a les especificacions establertes el millor model és el analògic, ja que compleix amb totes les especificacions i amb millors valors que el sistema digital:

- En el cas de la primera especificació tot i que ambdós sistemes la compleixen, el model digital presenta una lleugera millora en el cas del *roll* envers el *pitch*, és a dir, hi ha l'efecte de la dominància diagonal. El model analògic no presenta cap diferencia entre *roll* i *pitch*.
- Per la segona especificació ens trobem que el temps de resposta del model analògic és pràcticament instantani ja que és una les propietats del giroscopi mecànic, mentre que en el cas digital ens trobem un temps de resposta d'aproximadament 2 segons.
- L'especificació número 3, ambdós models la compleixen satisfactòriament.
- En el darrer cas, l'especificació número 4 ens trobem que ambdues metodologies ho assoleixen, no obstant, passat un temps prudencial en el cas de model digital es presenta una mica d'offset mentre que el model analògic segueix conservant les propietats.

Així doncs, tot i arribar a aquesta conclusió hem d'afegir que el sistema ideal no existeix ja que cadascun té propietats que el fan més idoni per algunes situacions que per d'altres. Per exemple, en casos on sigui imperatiu disminuir el volum de l'embarcació o no és pugui instal·lar els giroscopis per excés de pes, la ubicació de 2 giroscopis, que recordem que han de tenir entre un 3% i un 5% el pes de l'embarcació, no seria la millor opció. No obstant en embarcacions on es requereixi tenir un sistema robust i fiable serà més raonable utilitzar el model analògic.

D'altra banda, els problemes derivats de tenir diferents components elèctric i electrònics fan del sistema digital un alternativa més fràgil i susceptible a errors durant la instal·lació. Tanmateix el poc espai i pes que ocupa el fan una bona solució per a situacions on es requereixi ocupar el mínim volum possible.

En vista dels resultats i formes del model digital, també hem pensat en possibles aplicacions dins del sector marítim, degut a la naturalesa del mecanisme és imperatiu la pèrdua d'espai útil del vaixell al implementar-ho. Degut a això creiem que estaria més pensat per la nàutica privada, on prioritza abans el confort de l'embarcació que no pas la capacitat de carga.

Línies futures

Altres vegades pensant amb el disseny i formes del model, per no perdre volum interior, seria interessant ubicar els compartiments als costats de les embarcacions emulant els botes salvavides i/o a la part superior. D'aquesta forma no perds tant de volum com si és trobes a l'interior de l'embarcació, i no hem de patir tant per la pèrdua d'espai que comporta el mecanisme d'actuació.

Per altra banda, pensant més amb aquest projecte seria interessant poder dotar els sistemes amb més autonomia per tal de poder-los instal·lar en un ventall més ampli de llocs. Per el cas del model analògic és podrien instal·lar els motors DC directament als giroscopis per evitar que perdin la inèrcia necessària que els fa actuar, d'aquesta manera seria un sistema completament autònom. De cara el model digital hi ha varies opcions per proporcionar-li l'autonomia. Entre d'altres sistemes, és pot carregar el programa directament a la placa Arduino Mega però perds la opció de controlar els paràmetres del programa a temps real. No obstant podries conservar la digitalització de les dades connectant un dispositiu que ho permetés. Altres opcions serien l'adaptació del sistema a un aparell Bluetooth o wifi, que també en permetria el control.

Per últim punt cal destacar que el procediment de sintonització del controlador del model digital seguit en aquest projecte és una entre moltes possibilitats. Una d'elles és, per exemple, el control òptim.

Bibliografia i referències

- [1] Joan Jose Aliau Pons, *“Diseño y prototipado de un soporte giroscópico para cámara deportiva”*, upcommons, 13/07/2016 [En línia].
[Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/98712>]
[Últim accés: 12/10/2019]
- [2] *“Prácticas de Seguridad relatives a la estabilidad de buques pesqueros pequeños”* [En línia]
[Disponible en: <http://www.fao.org/3/i0625s/i0625s02d.pdf>]
[Últim accés: 20/01/20]
- [3] Rodrigo Pérez Fernández, José M^a Riola Rodríguez *“Estudio del fenómeno del mareo, desde los factores psicológicos hasta el emplazamiento en el buque”*, Març/Abril 2010 [En línia]
[Disponible en: https://revista-anales.ica.es/web/n_1/pdf/fenomeno_mareo.pdf]
[Últim accés: 20/01/20]
- [4] Daniel Chuk, *“Los sistemas de primer orden y los Controladores PID”*, 2012[En línia]
[Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control2/ControladoresPID.pdf>]
[Últim accés: 21/02/2020]
- [5] José Luis Marqués, *“Nutación del giroscopio”*, 15/06/2002 [En línia]
[Disponible en: <https://www.unirioja.es/dptos/dq/fa/rincon/giros/node4.html>]
[Últim accés: 15/02/2020]
- [6] *“Advanced programming UNIT 6”*, 2007 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]
[Últim accés: 08/03/2020]
- [7] *“Simulink UNIT 5”*, 2010 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]
[Últim accés: 08/03/2020]
- [8] T. W. KENYON, *“Stabilizer for sighting devices”* 29/10/1957 [En línia]
[Disponible en: <http://www.prutchi.com/wp-content/uploads/2012/03/US2811042.pdf>]
[Últim accés: 26/04/2020]

- [9] "M-file Programming UNIT 2", 2010 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]
[Últim accés: 08/03/2020]
- [10] Harry Gonzalez, "Estabilidad transversal" ,5/7/2011 [En línia]
[Disponible en: <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2011/07/estabilidad-inicial-transversal-v.html>]
[Últim accés: 20/08/2020]
- [11] Wikipedia, "SS Conte di Savoia", www.wikipedia.com [En línia]
[Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/SS_Conte_di_Savoia]
[Últim accés: 12/09/2020]
- [12] VEEMGYRO, "what is a marine gyrostabilizer?", veemgyro.com [En línia]
[Disponible en: <https://veemgyro.com/how-gyrostabilizers-work/>]
[Últim accés: 12/09/2020]
- [13] Wikipedia, "USS Henderson (AP-1)", www.wikipedia.com [En línia]
[Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Henderson_\(AP-1\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Henderson_(AP-1))]
[Últim accés: 12/09/2020]
- [14] Vicente García, "Configurar el MPU6050", 02/03/2018 [En línia]
[Disponible en: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/configurar-el-mpu6050>]
[Últim accés: 28/12/2019]
- [15] "Toolboxes UNIT 3", 2010 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]
[Últim accés: 08/03/2020]
- [16] Sergio Castillo, "Efectos de Adición de Ceros y Polos a las Funciones de Transferencia" ,2011 [En línia]
[Disponible en: <https://www.academia.edu/29314357/>]
[Últim accés: 26/02/2020]
- [17] Nicolás Supervielle Brouques, "Transformada de Laplace, Polos y Ceros en Análisis de Respuesta de Frecuencia", 03/2011 [En línia]
[Disponible en: <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Supervielle%20Nicolas.pdf>]
[Últim accés: 26/03/2020]
- [18] Wikipedia, "I2C", www.wikipedia.com [En línia]
[Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>]
[Últim accés: 14/09/2019]
- [19] "Graphics user interface UNIT 4", 2002 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]

- [Últim accés: 08/03/2020]
- [20] Walter Lewin, "Lec24: *Rolling Motion, Gyroscopes*, 8.01 Classical Mechanics, Fall 1999 (Walter Lewin)", YouTube, 2015 [En línia]
[Disponible en: https://www.youtube.com/channel/UCLiSRiiRVQuDfgxl_QN_Fmw/videos]
[Últim accés: 02/01/2020]
- [21] "MATLAB Fundamentals and Graphics UNIT 1", 2012 [PDF]
[Obtingut de: Sistemes de control i xarxes informàtiques del vaixell]
[Últim accés: 06/06/2020]
- [22] Tecnologiamaritima2000, "Estabilizadores giroscópicos", 21/02/2019 [En línia]
[Disponible en: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2019/02/estabilizadores-giroscopicos.html>]
[Últim accés: 12/09/2020]
- [23] Gyroscope.com "Super precision gyroscope", www.gyroscope.com [En línia]
[Disponible en: [https://www.gyroscope.com/d.asp?product=RATEKIT#change\(currency\)](https://www.gyroscope.com/d.asp?product=RATEKIT#change(currency))]
[Últim accés: 16/02/2020]
- [24] Luís Llamas, "Controlar un servo con Arduino", 06/06/2016 [En línia]
[Disponible en: <https://www.luisllamas.es/controlar-un-servo-con-arduino/>]
[Últim accés: 29/03/2020]
- [25] Mathwoks, "Servo Control", mathworks.com [En línia]
[Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/examples/servo-control.html>]
[Últim accés: 28/07/2020]
- [26] The Editors of Encyclopaedia Britannica, "Gyroscope", britannica.com [En línia]
[Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/gyroscope>]
[Últim accés: 02/09/2020]
- [27] Wikipedia, "Gyroscope", www.wikipedia.com [En línia]
[Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>]
[Últim accés: 06/08/2020]
- [28] James Croxon, "Types of Gyroscopes", 24/04/2017 [En línia]
[Disponible en: <https://sciencing.com/types-gyroscopes-7329313.html>]
[Últim accés: 20/08/2019]
- [29] Wikipedia, "Estabilidad transversal", www.wikipedia.com [En línia]
[Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Estabilidad_transversal#/]
[Últim accés: 06/09/2020]
- [30] LP~commonswiki, "File:Gyroscope-9-4.png" www.wikimedia.org, 28/11/2006 [En línia]

- [Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gyroscope-9-4.png>]
[Últim accés: 02/03/2020]
- [31] TutosIngenieria "Medición angular con giroscopio MPU6050 con arduino y simulink de Matlab", www.YouTube.com [En línia]
[Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=iUTgTCBRvSg&t=4s>]
[Últim accés: 26/06/2020]
- [32] TutosIngenieria "Medición de ángulo con aceleraciones del MPU6050, arduino y Matlab", www.YouTube.com 27/04/2016 [En línia]
[Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=pz-sEku-jGM&t=80s>]
[Últim accés: 26/08/2020]
- [33] Surfer Rule "El equilibrio en el surf, el aspecto más importante", 08/2019 [En línia]
[Disponible en: <https://www.surferrule.com/equilibrio-surf-aspecto-mas-importante/>]
[Últim accés: 26/06/2020]
- [34] Dumpa, "La espiral de diseño", 01/05/2018 [En línia]
[Disponible en: <https://dumpa.co/la-espiral-de-diseno/>]
[Últim accés: 28/06/2020]
- [35] Brosen, "shipsmovemensonthewave.svg" www.wikimeida.org 05/2006 [En línia]
[Disponible en: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Brosen_shipsmovemensonthewave.svg]
[Últim accés: 23/08/2020]
- [36] Xavier Snelgrove "PrecessionOfATop.svg" www.wikipmedia.org 05/04/2007 [En línia]
[Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PrecessionOfATop.svg>]
[Últim accés: 26/03/2020]
- [37] Blog-Plotter-HP "AutoCAD 2020", www.plooter-hp.com 24/04/2019 [En línia]
[Disponible en: <https://plotter-hp.com/novedades-autocad-2020/>]
[Últim accés: 14/09/2020]
- [38] Dirk Van Oosterbosch, "Fritzing icon.png" www.wikipedia.org 08/04/2015 [En línia]
[Disponible en: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Fritzing_icon.png]
[Últim accés: 26/03/2020]
- [39] Manuel Crespo, "Arduino MEGA 2560", 2015 [En línia]
[Disponible en: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/arduino-mega-2560.html>]
[Últim accés: 24/07/2020]
- [40] Root, "Mpu6050-1.jpg", wiki.sunfounder.cc 06/09/2019 [En línia]
[Disponible en: <http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=File:Mpu6050-1.jpg>]

[Últim accés: 26/04/2020]

- [41] Christopher Mcfadden, "What Gyroscope Are, How they Work, and their importance", Interestingengineering.com [En línia]

[Disponible en: <https://interestingengineering.com/what-gyroscopes-are-how-they-work-and-their-importance>]

[Últim accés:03/02/2020]

- [42] Joshua Husrt: Rensselaer Arduino Support Package (RASPLib)

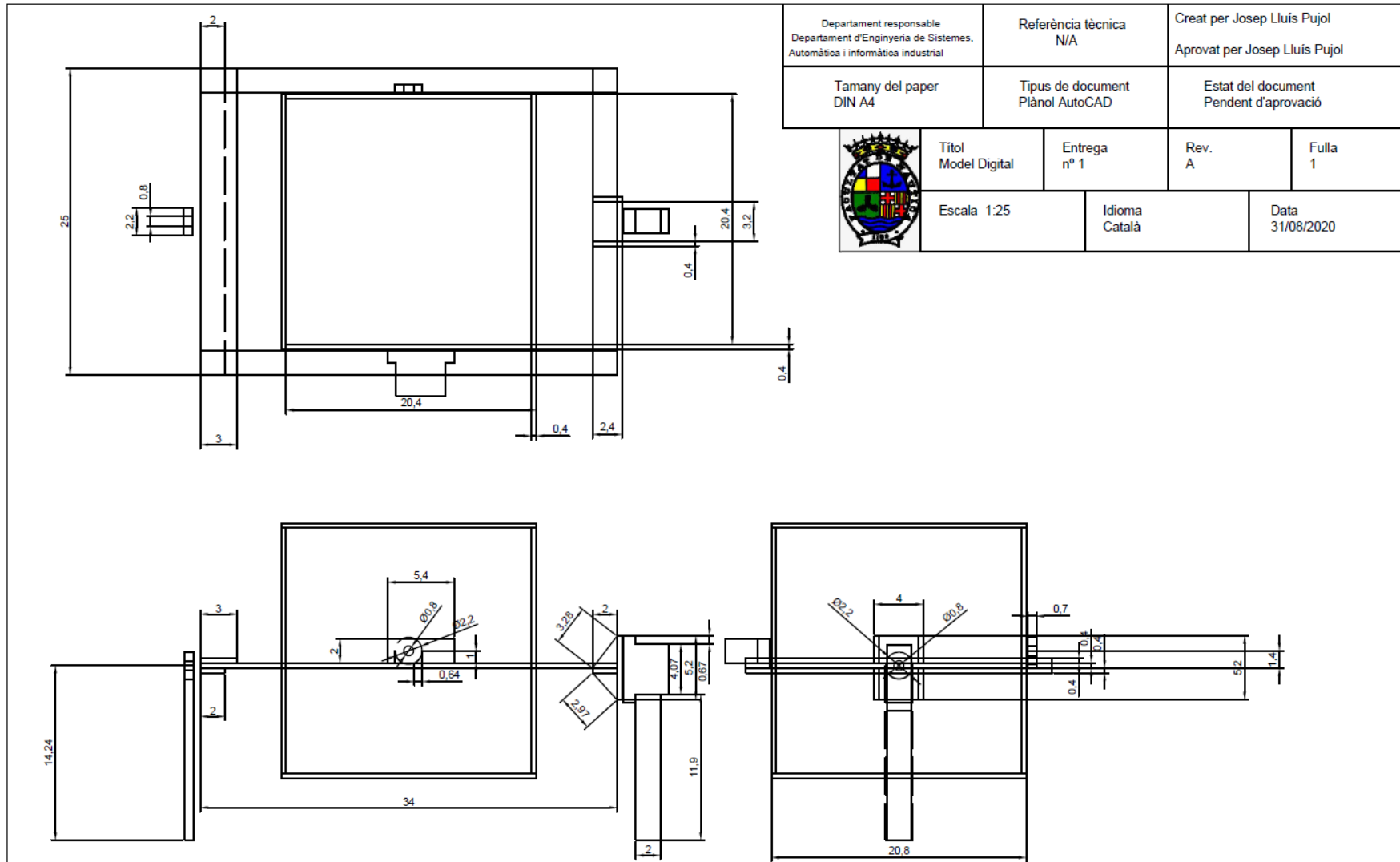
[Disponible en: <http://homepages.rpi.edu/~hurstj2/>]

[Últim accés: 30/12/2019]

Annex I

Plànols del sistema d'estabilització

Sistema Digital



Sistema Analògic

